

文章编号: 0253-2239(2009)06-1536-06

# 复杂背景下红外弱小多目标跟踪系统

罗 寰 于 雷 廖 俊 穆 中 林

(空军工程大学工程教研室, 陕西 西安 710038)

**摘要** 针对复杂天空背景条件下低信噪比的红外弱小目标跟踪问题,设计了一种多目标跟踪系统。首先计算红外图像的光流场,结合阈值分割和形态学滤波等数学方法检测出目标;在该结果的基础上,结合目标运动的连续性,运用邻域轨迹预测的方法滤除检测过程中产生的噪声;随后运用卡尔曼滤波轨迹预测的方法解决在跟踪过程中目标丢失的问题,并解决当多目标轨迹出现交联时如何辨识出各个目标轨迹的问题。该系统充分运用了目标的运动特性避免了噪声的干扰和目标轨迹混淆。使用长波红外热像仪采集的红外序列图像对系统进行了验证,实验结果及相应理论分析表明该系统可有效实现复杂背景下的红外弱小目标跟踪。

**关键词** 光学器件; 探测器; 红外技术; 多目标跟踪; 光流; 轨迹预测

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092906.1536

## Tracking Framework for Small Infrared Multi-Target in Complex Background

Luo Huan Yu Lei Liao Jun Mu Zhonglin

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shanxi 710038, China)

**Abstract** A multi-target tracking framework is designed to detect small infrared targets under complex backgrounds when the signal-to-noise-ratio (SNR) is low. The infrared image's optical flow field is calculated, based on which the mathematic methods including segmentation of threshold and mathematical morphological filter are employed to detect the infrared target from the backgrounds. Based on the results, with the target moving continuously, the neighborhood predict arithmetic is used to we eliminate the noise generated in the process of detection. The track prediction method based on Kalman filter is given to solve the problems of target missing and track crossover. This framework avoids the interference of the noise and the confusion of multi-track through the moving characteristic of targets. The infrared sequence images got from long-wavelength infrared camera verify that this framework is effective to track the small infrared targets under complex backgrounds.

**Key words** optic device; detector; infrared technique; multi-target tracking; optical flow; track prediction

### 1 引 言

对于红外多目标的各种检测算法目前主要分为单帧目标检测和序列帧目标检测。单帧检测算法如自适应背景预测检测<sup>[1]</sup>、形态学方法<sup>[2~4]</sup>、边缘检测法<sup>[5]</sup>等,特点是计算量少、速度快,但在背景复杂或噪声显著时检测性能受到很大影响。作为超视距的红外目标,目标产生的红外信号反映在红外探测器

上小于或接近传感器的分辨率。这样在探测器上形成的图像没有形状与尺寸的信息资源可以利用,但是可以过检测空间——时间坐标系内目标、背景图像能量的流动来检测目标的存在。因此,本文采用序列帧检测算法中的光流法来对红外弱小多目标进行检测。

多目标轨迹辨识主要需要解决三个问题:一是

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-11-07

基金项目: 军队重点科研项目基金(KJ06090)资助课题。

作者简介: 罗 寰(1981—),男,博士研究生,主要从事航空武器系统总体、仿真与控制等方面的研究。

E-mail: luohuan928@sohu.com

导师简介: 于 雷(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事航空武器系统总体、仿真与控制等方面的研究。

E-mail: yuleiafce@sohu.com

在跟踪过程中需要剔除目标检测算法中误检的噪声点；二是如果在跟踪过程中出现目标暂时丢失时能够对目标轨迹进行预测，保持一定时间直至目标重新出现；三是如果多目标出现重叠或交联时能够辨析出各个目标的轨迹。解决方法主要有考虑目标的运动性和噪声产生的随机性。对于噪声的滤除可以用基于邻域预测的方法滤除；对于多目标的轨迹关联和辨识，主要解决方法有 Mean Shift 跟踪算法<sup>[6]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[7]</sup>、粒子滤波<sup>[8]</sup>等方法。由于在多目标跟踪过程中，并不需要预测目标的整个运动轨迹，而只是预测其中被漏检的一小段轨迹，因此可以把目标看作是匀速直线运动，使用计算量较小的线形滤波器如卡尔曼滤波器进行预测。本文首先通过邻域预测的方法剔除噪声，在随后的跟踪过程中利用卡尔曼滤波预测实现目标轨迹的关联，如果多目标轨迹存在重叠或交联时，辨析出各目标的轨迹。

## 2 基于光流估计的目标检测算法

有效的目标提取是准确判别和跟踪的基础。本节描述了一种基于 Horn-Schunck 光流场算法的目标检测方法，该方法对于运动的红外弱小多目标具有很好的检测效果。

### 2.1 红外背景的数学表述

红外图像中主要分为背景、目标和噪声三部分，一幅红外图像的数学模型<sup>[9]</sup>可以由以下公式来描述：

$$Y(m, n) = B(m, n) + T(m, n) + N(m, n), \quad (1)$$

上式中  $Y(m, n)$  表示红外图像， $m$  和  $n$  分别表示图像中的横坐标和纵坐标， $B(m, n)$  表示图像中的背景成分； $T(m, n)$  表示图像中的目标成分； $N(m, n)$  表示图像中的随机噪声成分。

红外小目标：当目标距离成像传感器较远时，目标所成的像较小。在红外图像上仅仅占据几个或几十个像素，而没有形状、大小和纹理等特征，缺乏目标的结构信息。但由于目标是运动的，在空间-时间坐标系内将产生连续的能量流动，容易被基于光流估计的目标检测算法检测到。

红外背景：主要是大面积缓慢变化的低频部分，它们在空间上往往呈大面积的连续分布，但相对稳定，在红外图像的帧与帧之间不产生能量流动。

噪声：主要分两部分，一是红外探测器系统的内部噪声，主要特征是亮度高，尺寸小，持续时间短（1~2 帧），可以近似认为服从高斯分布或白噪声<sup>[10]</sup>，容易被误检为目标；另一部分是由云层边缘

点引起的检测噪声，由于云层的运动及边缘的灰度值变化，在某些相关帧之间也容易误检为目标，但持续时间短，一般只有一帧时间。

### 2.2 Horn-Schunck 光流场算法

光流计算主要基于亮度恒常性假设，约束方程为：

$$I_x u + I_y v + I_t = 0, \quad (2)$$

其中  $I_x, I_y$  和  $I_t$  是亮度在时间和空间上的导数， $u$  代表水平光流， $v$  代表垂直光流。由于式(2)无解，基于光流场平滑性假设条件，即光流在整个图像上的变化平滑，通过计算矢量场的估计值，使下式最小：

$$E = \iint (I_x u + I_y v + I_t)^2 dx dy + \alpha \iint \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy, \quad (3)$$

式中  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$  代表光流矢量  $u$  和  $v$  在空间上的导数， $\alpha$  为正则系数，代表了全局平滑项的比例，通过变分法和递归算法可以得到  $(u, v)$  的递归解：

$$\begin{cases} u_{x,y}^{k+1} = \bar{u}_{x,y}^k - \frac{I_x [I_x \bar{u}_{x,y}^k + I_y \bar{u}_{x,y}^k + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2}, \\ v_{x,y}^{k+1} = \bar{v}_{x,y}^k - \frac{I_y [I_x \bar{v}_{x,y}^k + I_y \bar{v}_{x,y}^k + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2}, \end{cases} \quad (4)$$

其中  $[u_{x,y}^k, v_{x,y}^k]$  表示为等  $k$  帧图像像素点  $(x, y)$  处的光流矢量， $[\bar{u}_{x,y}^k, \bar{v}_{x,y}^k]$  是  $[u_{x,y}^k, v_{x,y}^k]$  邻域内的光流平均值。当  $k=0$  时，光流矢量初值为  $[0, 0]$ 。

### 2.3 基于光流的目标检测算法

目标检测算法首先通过 Horn-Schunck 光流场算法计算出图像每个像素点的光流矢量  $[u_{x,y}^k, v_{x,y}^k]$  得到图像的光流场，然后对前帧和本帧的所有点光流矢量求取平均值作为分割阈值。运用阈值对图像的光流场进行分割，得到光流场的二值化矩阵。此时，矩阵包含了目标的二值信息，由于弱小的红外目标可能分割出不连续的几个点，因此运用数学形态学滤波可以将分割出来的目标完整和平滑，得到目标检测实际结果。

#### 2.3.1 阈值分割

定义每个像素点的光流代数表示为

$$|U_{x,y}|^2 = u_{x,y}^2 + v_{x,y}^2, \quad (5)$$

若定义图像大小为  $m \times n$ ，则每帧光流场的分割阈值<sup>[11,12]</sup>为

$$T^k = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n |U_{x,y}^k|^2 + \right.$$

$$\frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n |U_{x,y}^{k-1}|^2 \Big). \quad (6)$$

对图像的光流矩阵  $\mathbf{A}^k_{|U_{x,y}|^2}$  用阈值  $T^k$  进行分割则可得包含目标点信息的二值化矩阵  $\mathbf{P}^k$ , 矩阵中元素取值为

$$\mathbf{P}_{x,y}^k = \begin{cases} 1 & |U_{x,y}|^2 \geq T^k \\ 0 & |U_{x,y}|^2 \leq T^k \end{cases}. \quad (7)$$

### 2.3.2 数学形态学滤波

使用数学形态学的闭运算对二值化矩阵  $\mathbf{P}^k$  进行滤波。利用该运算可以填充物体内细小空间, 连接邻近点, 平滑其边界。

定义数学形态学滤波的闭运算<sup>[13]</sup>为

$$\text{CLOSE}(\mathbf{P}^k, \mathbf{B}) = \mathbf{P}^{k\mathbf{B}} = \mathbf{P}^k \cdot \mathbf{B} = (\mathbf{P}^k \oplus \mathbf{B}) \ominus \mathbf{B}, \quad (8)$$

其中  $\mathbf{B}$  为形态学运算的结构元素, 定义

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

通过滤波则可得目标信息集合  $\{S_1, S_2, \dots, S_i\}$ 。

目标检测算法流程如图 1 所示。

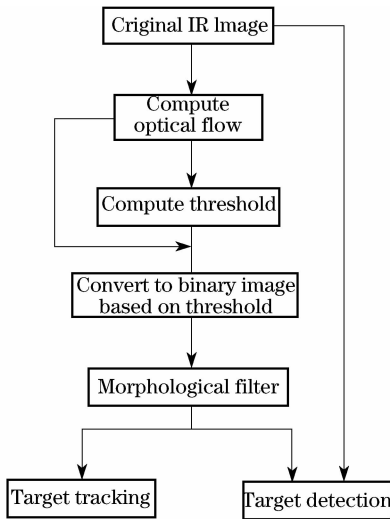


图 1 目标检测流程

Fig. 1 Flow chart of target detection

## 3 基于轨迹预测的目标跟踪算法

目标被正确检测出来后, 需要对噪声进行滤除以及对多目标轨迹的关联和辨识。本节重点讨论基于轨迹预测的目标跟踪算法。

### 3.1 基于邻域轨迹预测的噪声滤除

根据 2.1 节的分析可知, 由于目标运动的连续性, 在红外成像速度足够时 (一般 15 f/s ~ 25 f/s), 目标第  $k+1$  帧的位置必定在第  $k$  帧位置的某个小

邻域内。而由探测器产生的热噪声和云层的边缘点由于分布和产生的随机性, 在连续红外图像中并没有这种连续性, 所以应用这个特点, 可以剔除虚假目标点。

以连续的三帧红外图像邻域轨迹预测算法为例, 设目标  $i$  在第  $k, k+1, k+2$  帧的位置分别为  $(x_i^k, y_i^k), (x_i^{k+1}, y_i^{k+1})$  和  $(x_i^{k+2}, y_i^{k+2})$ , 则应满足:

$$\begin{cases} x_i^{k+1} - a \leq x_i^k \leq x_i^{k+1} + a, \\ y_i^{k+1} + a \leq y_i^k \leq y_i^{k+1} + a, \\ x_i^{k+2} - a \leq x_i^{k+1} \leq x_i^{k+2} + a, \\ y_i^{k+2} + a \leq y_i^{k+1} \leq y_i^{k+2} + a, \end{cases} \quad (9)$$

其中  $a$  为邻域大小, 如果满足 (9) 式则判断目标  $i$  为真实目标点, 从此时开始记录下目标位置  $(x_i^{k+2}, y_i^{k+2})$ , 否则认为是虚假目标点予以剔除。以此类推, 继续找出第  $k+3$  帧及以后帧的目标。

由上可知, 邻域轨迹预测采用的是“管道式”滤波的方法, 从图像第三帧开始可以持续输出真实目标点, 满足后续目标轨迹关联算法的实时性要求。同时利用邻域轨迹预测的方法剔除噪声要求目标在被检测时必须保证至少连续 3 帧内能够被检测到, 否则会被当成噪声点剔除, 这对检测算法提出了较高的要求, 同时也保证了跟踪时的精度。

### 3.2 基于卡尔曼滤波的目标轨迹预测

卡尔曼 (Kalman) 滤波<sup>[14,15]</sup> 是一种线性最小方差估计, 滤波过程是以不断地“预测—修正”的递推方式进行计算。先进行预测值计算, 再根据观测值得到的新信息和 Kalman 增益 (加权项), 对预测值进行修正。由滤波器值可以得到预测, 又由预测可以得到滤波, 其滤波和预测相互作用, 并不要求存储任何观测数据, 可以进行实时处理。

通过噪声滤除环节后, 可以认为系统输出的目标点均为真实目标点, 基于卡尔曼滤波预测的多目标跟踪算法流程如图 2。

算法流程说明如下:

1) 首先对第  $k$  帧的所有目标利用邻域轨迹预测判断在第  $k+1$  帧中是否存在相对应的目标点位置, 如果只存在一个目标位置则更新目标位置; 若多个目标位置则判定出现轨迹交联; 若不存在目标位置则判定目标丢失。

然后对第  $k+1$  帧中存在的目标点在第  $k$  帧中寻找匹配点, 如果有目标点不存在相应的匹配点, 则认为该目标是新增目标并记录其位置信息。

2) 如果只存在一个新目标位置信息, 则利用新位置进行该目标运动轨迹的 Kalman 滤波估计, 进

一步修正滤波中的状态估计值。

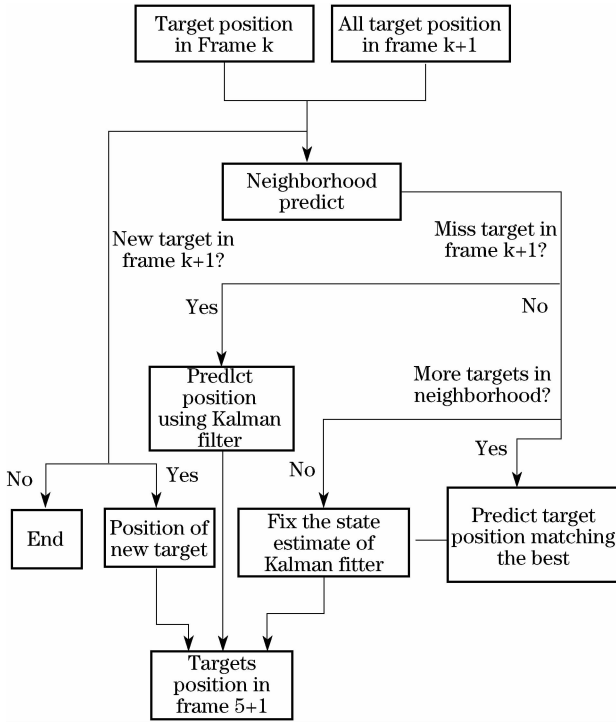


图 2 基于卡尔曼滤波预测的多目标跟踪算法流程

Fig. 2 Flow chart of multi-target tracking based on Kalman filter

3) 如果丢失目标, 则用 Kalman 滤波预测出目标在第  $k+1$  帧中的位置, 同时更新目标位置, 并标记为预测值。连续预测的次数不能大于设定值  $T$ , 否则由于长时间没有目标观测值的修正, 如果目标出现加速或转弯会使预测值与真实值之间的误差越来越大, 最终完全偏离真实轨迹。所以当连续预测次数等于  $T$  时, 认为目标已经完全丢失, 抛弃该目标, 停止预测。

4) 如果出现轨迹交联, 则先用 Kalman 滤波预测目标的位置, 然后与存在的多个目标值进行对比匹配<sup>[16,17]</sup>。利用公式(9)找出使  $\delta^2$  最小的目标位置  $(X_i^p, Y_i^p)$ 。

$$\delta^2 = (X_i - \hat{X}_i)^2 + (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (10)$$

其中  $(X_i, Y_i)$  表示每个存在的目标点位置,  $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i)$  表示预测出来的位置。随后用  $(X_i^p, Y_i^p)$  更新目标位置信息, 并继续修正状态估计值。

5) 综合上述三种情况, 得到第  $k+1$  帧的实际目标数量及位置。

## 4 实验及结果分析

本节采用非制冷型长波热像仪进行实验, 该热像仪的 CCD 面阵大小为  $320 \times 240$ , 连续 225 帧红

外序列图像反映了复杂天空背景下的红外多目标运动情况。

### 4.1 目标检测

定义图像信噪比(SNR)<sup>[18]</sup>为

$$R_{SN} = \frac{S}{C}, \quad (11)$$

其中  $S$  代表平均目标灰度,  $C$  表示噪声(包含背景)均方差。可以计算出整个图像的信噪比在 4.8 到 5.1 之间, 图 3 给出红外序列图像的第 10、97 帧图像。

检测算法得到的目标轨迹如图 4 所示。



(a) the 10th frame



(b) the 97th frame

图 3 红外序列图像

Fig. 3 Original sequence infrared images

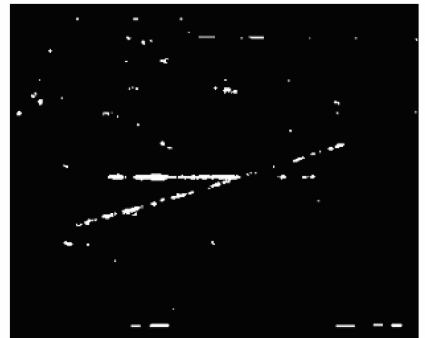


图 4 目标运动轨迹

Fig. 4 Track of moving targets

### 4.2 噪声滤除

可以看出由于探测器内部热噪声的干扰以及云层边缘点的影响, 目标运动轨迹中混杂了大量的虚假目标点, 经过邻域轨迹预测滤波后, 得到真实的目标运动轨迹如图 5 所示。

可以看出原来检测算法产生的噪声点已经被剔除, 正确的目标点被保存, 由于噪声的滤除是判断目

标运动的连续性,几个单独的目标轨迹点也被滤除掉了,为了得到完整的目标轨迹,需要进一步预测目标轨迹。



图 5 噪声滤除后的目标轨迹

Fig. 5 Track of moving targets after noise elimination

#### 4.3 卡尔曼滤波预测目标轨迹

图 5 中的目标点轨迹并不连续,而且在轨迹上有重叠,为了完整的跟踪目标并且对目标进行标记,可以利用基于轨迹预测的算法来解决。实验用卡尔曼预测算法对目标轨迹进行连续跟踪和识别。卡尔曼预测算法目标连续跟踪结果如图 6 所示。



图 6 卡尔曼预测目标轨迹

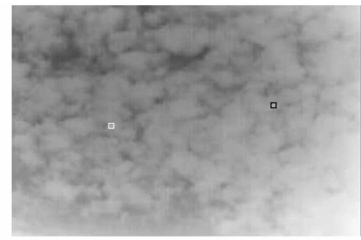
Fig. 6 Track of moving targets predicted by Kalman filter

图 6 是连续跟踪的目标轨迹图,图 7 是实时跟踪结果。其中,白色矩形标识的目标是实际检测出的目标位置,黑色矩形标识的目标是通过预测算法推算出来的目标位置。在图 7(b)中,两个目标的位置互在对方的邻域位置范围内,此时如果不进行轨迹辨识则无法得到目标的真实轨迹。由图 7 的结果可以看出通过预测得到了正确的目标轨迹。

## 5 结 论

设计了一种红外弱小多目标跟踪系统,首先利用光流场检测算法提取出可能的目标,然后利用邻域轨迹滤波剔除检测过程中的噪声,最后对目标轨迹进行卡尔曼滤波得到完整的目标轨迹,并在多目

标交界处辨识目标轨迹。实验结果表明本文提出的系统框架对红外弱小多目标的跟踪是有效的。



(a) the 10th frame



(b) the 97th frame

图 7 目标跟踪结果

Fig. 7 Result of tracking targets

## 参 考 文 献

- 1 B. S. Denney, R. J. P. de Figueiredo. Optimal point target detection using adaptive auto regressive background [C]. *SPIE*, 2000, **4048**:46~57
- 2 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
- 3 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
- 4 Tong Wuqin, Ling Yongshun, Huang Chaochao *et al.*. Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1):138~144  
同武勤,凌永顺,黄超超 等.数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(1):138~144
- 5 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
- 6 Cheng Jian, Yang Jie. Novel infrared object tracking method based on mean shift [J]. *J. Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(3):231~235  
程 建,杨 杰.一种基于均值移的红外目标跟踪新方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(3):231~235
- 7 Yang Xiuhua. *Application Research of Prediction Filtering Technology on Optoelectronic Target Tracking* [D]. Changchun: Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, 2004  
杨秀华.预测滤波技术在光电目标跟踪中的应用研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2004
- 8 Cheng Jian, Zhou Yue, Cai Nian *et al.*. Infrared object tracking based on particle filters [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*,

- 2006, **25**(2):113~117  
程建,周越,蔡念等. 基于粒子滤波的红外目标跟踪[J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(2):113~117
- 9 Zhang Tianxu. *Automated Recognition of Imaged Target*[M]. 2005:221~239  
张天序. 成像自动目标识别[M]. 湖北科学技术出版社. 2005:221~239
- 10 Nishiguchi K, Kobayashi M, Ichikawa A. Small target detection from image sequences using recursive max filter[C]. *SPIE*, 1995, **2561**:153~165
- 11 Cai Meiyuan, Wu Qingxian, Jiang Changsheng. Target image segmentation based on modified Otsu algorithm[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, **14**(6):118~151  
蔡梅艳,吴庆宪,姜长生. 改进 Otsu 法的目标图像分割[J]. 光电与控制, 2007, **14**(6):118~151
- 12 Li Zhuo, Guo Lihong. An image preprocessing algorithm of small target under heavy cloud clutter background [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, **14**(1):10~13  
李卓,郭立红. 强起伏云背景下的小目标图像预处理算法[J]. 光电与控制, 2007, **14**(1):10~13
- 13 The MathWorks. *Matlab Documentation*[Z]. 2007
- 14 Qin Yongyuan, Zhang Hongyue, Wang Shuhua. *Kalman Filter and Combined Navigation Principle* [M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Pres, 2004:65~66  
秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2004:65~66
- 15 Xu Jian, Duan Zheming. Kalman filter in target tracking [J]. *Computer Simulation*, 2005, **22**(11):120~122  
徐剑,段哲民. 卡尔曼预测器在目标相关跟踪中的应用[J]. 计算机仿真, 2005. **22**(11):120~122
- 16 Zhong Shengfang, Zhang Bin, Lu Huanzhang. Track-association algorithm of point target based on dynamic programming [J]. *Computer Measurement & Control*, 2004. **12**(8):772~774  
钟圣芳,张兵,卢焕章. 一种基于动态规划的点目标轨迹关联算法[J]. 计算机测量与控制, 2004. **12**(8):772~774
- 17 Zhang Bing, Lu Huanzhang. The detection algorithm for moving point target trajectory in image Sequences [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004. **32**(9):1524~1526  
张兵,卢焕章. 序列图像中运动点目标轨迹检测算法研究[J]. 电子学报, 2004. **32**(9):1524~1526
- 18 Le Zhongxin. *Digital Image Processing* [M]. 2003:102~199  
勒中鑫. 数字图像处理[M]. 国防工业出版社. 2003:102~199

## *Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)

### 2009 年“*Digital and Computer-Generated Holography*” 专题征稿启事

*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》) 计划于 2009 年 12 月在正刊上推出“*Digital and Computer-Generated Holography*”(“数字与计算全息”)专题,特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Digital holography theory and systems
- Phase unwrapping
- Computer generated holograms
- Spatial light modulators for holography
- Holographic optical elements
- 2D and 3D pattern recognition
- Three-dimensional imaging and processing
- Three-dimensional display
- 2D-3D content conversion
- Shape and deformation measurement
- Holographic imaging and microscopy
- Holographic Optical Micro-Manipulation

Feature Editor:

Ting-Chung Poon, Ph. D., Professor

Bradley Department of Electrical and Computer Engineering

Virginia Tech

Blacksburg, Virginia 24061 USA

截稿日期:2009 年 7 月 15 日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn[主题标明“专题(具体名称)投稿”],或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission,备注中写明具体专题名称,推荐用此方式投稿),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。