第 38 卷 第 7 期 系统工程与电子技术 Vol. 38 No. 7
2016 年 7 月 Systems Engineering and Electronics July 2016
文章编号:1001-506X(2016)07-1508-08 网址:www. sys-ele. com

光电经纬仪自适应调焦窗口构建

王冠军[1,2],吴志勇[1],云海姣[1,2],刘雪超[3],梁敏华[1],杨 华[1]
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电测控部,吉林 长春 130033;2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 西安建筑科技大学机电工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:为解决靶场测量中基于图像处理的光电经纬仪自动调焦过程中计算量大和背景干扰的问题,提出一种大小和位置自适应目标变化的调焦窗口构建方法。该方法利用 Mean-shift 算法进行跟踪获得目标位置信息,并以目标中心位置为参考点,计算图像像素归属度;使用 Log-Gabor 滤波器组和高斯差分模型模拟人类视觉系统进行显著性检测,以归属度加权的视觉显著性特征确定目标区域,结合 Epanechnikov 核函数构建自适应核函数,降低目标尺度变化及背景像素的影响,实现目标的有效跟踪。对目标区域利用对角邻域法进行边界扩展,构建自适应目标变化的调焦窗口。在某型号光电经纬仪上的实验结果证明,该方法能够实时、有效地跟踪目标并构建调焦窗口。处理 720 piexl×576 piexl 大小的图像,耗时小于 20 ms,满足光电经纬仪实际需求,具有广泛的工程应用价值。

关键词:自动调焦;自适应调焦窗口;Mean-shift;归属度;Log-Gabor;视觉显著性
中图分类号:TP 394.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.05

Design of self-adaptive focus window for photoelectrical theodolite

WANG Guan-jun[1,2], WU Zhi-yong[1], YUN Hai-jiao[1,2],
LIU Xue-chao[3], LIANG Min-hua[1], YANG Hua[3]
(*1. Department of Photoelectric Measurement and Control, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Mechanical and Electrical Engineering College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

Abstract: In order to build a right focus window to cut down the compute time and overcome the disturbance of the background for the photoelectrical theodolite in range measurement, a novel method is proposed. Firstly, the method regards the target's centroid gotten by the Mean-shift tracking algorithm as the reference point to compute the adscription of pixel. Secondly, visual saliency weighted by the adscription is detected by Log-Gabor filters and the Gaussian difference model to ascertain the target area. Then, the adaptive kernel function is designed to track the target combined with the Epanechnikov function, which can reduce the effects of fixed track window and background pixels. Finally, the focus window is built with boundary extension by the estimating diagonal area, and the size and position of the focus window are self-adaptive with the target. After plenty of experiments on the photoelectrical theodolite, the results show that the proposed method can effectively track moving targets in real time and build focus window exactly. To deal with image of 720 pixel×576 pixel, the compute time is less than 20 ms. The proposed method satisfies the practical demand of the photoelectrical theodolite and is of great value for engineering application.

Keywords: auto-focus; self-adaptive focus window; Mean-shift; adscription; Log-Gabor; visual saliency

0 引 言

现代靶场测量中,由于导弹、靶机等运动目标的位置实时变化导致成像模糊[1],影响控制中心的指挥决策。因此,构建快速、准确的自动调焦系统获得清晰图像,对光电经纬仪靶场测量具有重要的工程价值。目前,聚焦深度法在基于图像处理的调焦领域中应用广泛,其主要包含:调焦窗口构建、图像质量评价以及调焦搜索策略执行[2]。作为自动调焦过程的第一步,构建包含目标主体、位置准确的调焦窗口,能够克服背景干扰,降低计算量,对整个调焦系统至关重要。

收稿日期:2014-11-13;**修回日期**:2016-01-04;**网络优先出版日期**:2016-03-03。
网络优先出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20160303.1709.006.html
基金项目:吉林省自然科学基金(201115124)资助课题

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

靶场任务中获得的图像背景相对简单，但会存在一定的自然或人造景物干扰。中央区域法、多区域法、非均匀采样法以及黄金分割法等传统方法构建调焦窗口，其大小、位置不变[3]，不能有效为动态目标构建调焦窗口。随着现代靶场测量技术的发展，亟需一种能适应目标变化的动态调焦窗口构建方法。大量科研工作者对此进行了广泛研究，文献[3]在已知目标位置情况下，采集多帧图像，利用脱靶量信息预测下一帧目标位置，建立位置变化的调焦窗口；文献[4]根据图像边缘细节丰富程度的不同，选取细节最丰富的区域作为调焦窗口；文献[5]根据图像配准理论，提取图像轮廓信息构建调焦窗口；文献[6]提出一种基于图像一阶矩的动态窗口构建方式，以灰度“重心”为中心构建调焦窗口。上述几种方法采用大小固定的窗口，未充分考虑目标尺寸，易受背景干扰，无法适应不同目标。文献[2]提出一种结合视觉感知的调焦窗口构建方法，窗口大小可变，但该法易受环境和非目标的干扰，不能保证窗口构建的有效性。

在光电经纬仪自动调焦过程中，仅仅依靠单帧图像构建调焦窗口，忽略了动态目标位置变化信息。本文从目标跟踪的角度出发，将 Mean-shift 跟踪算法和视觉显著性检测相结合，进行目标提取，对角邻域法边界扩展后，构建大小和位置自适应目标变化的调焦窗口，并更新 Mean-shift 算法的跟踪窗口和目标特性，实现目标的有效跟踪。在跟踪过程中，本文算法能够有效克服环境和非目标的干扰，为光电经纬仪自动调焦系统构建自适应目标变化的调焦窗口。

1　Mean-shift 算法

传统的 Mean-shift 跟踪算法是一种基于梯度的无参密度估计算法，以灰度直方图为特征对跟踪目标进行建模，通过不断迭代寻找目标模型与候选区域目标模型相似系数最大的点，作为被跟踪目标的中心位置[7-8]。传统的 Mean-shift 算法可主要分为以下几步。

1.1　初始目标特征计算

在目标跟踪开始阶段，在初始帧中手动选择一个完整包含目标的矩形区域表示初始目标区域，以核函数加权的灰度直方图表示目标模型的特征向量，如式(1)所示。

$$\boldsymbol{q}_u = C\sum_{i=1}^{N} k\left(\left\| \frac{X_i - X_*}{h} \right\|^2\right) \cdot \delta[l(X_i) - u],\quad u \in \{1,2,\cdots,m\} \tag{1}$$

式中，$\{X_i\}_{i=1,2,\cdots,N}$ 是以目标区域中心 X_* 为原点的像素坐标；N 为目标区域内的总像素数；m 为目标区域灰度直方图的灰度级别总数；$\delta()$ 为 delta 函数；映射 $l: R^2 \rightarrow \{1,2,\cdots m\}$ 把相应位置处的灰度信息映射到相应的灰度直方图栅格中；C 为归一化常数，通过约束条件 $\sum_{u=1}^{N} \boldsymbol{q}_u = 1$ 可得到 $C = 1/\sum_{u=1}^{N} k\left(\left\| \frac{X_i - X_*}{h} \right\|^2\right)$；$k(x)$ 是核函数的剖面函数；$\| X \|$ 表示 X 的范数；h 为核函数窗宽，同时为跟踪窗口的大小。通过核函数给目标区域的像素进行加权，弱化边缘像素的同时突出中心像素。

Mean-shift 算法中常用的核函数有：单位均匀核函数、单位高斯核函数以及 Epanechnikov 核函数。在本文中选择 Epanechnikov 核函数，表示为

$$K(x) = \begin{cases} c(1 - \| x \|^2), & \| x \| \leqslant 1 \\ 0, & \| x \| > 1 \end{cases} \tag{2}$$

1.2　候选目标区域特征计算

运动目标在第二帧及后续每帧中可能出现的区域为候选目标区域。$\{Y_i\}_{i=1,2,\cdots,N_h}$ 是目标候选区域的像素坐标，中心位置为 y_0，与初始目标特征计算相似，以 y_0 为中心的候选模型可表示为

$$\boldsymbol{p}_u(y) = C_h \sum_{i=1}^{N_h} k\left(\left\| \frac{Y_i - Y_0}{h} \right\|^2\right) \cdot \delta[b(Y_i) - u],\quad u \in \{1,2,\cdots,m\} \tag{3}$$

式中

$$C_h = 1/\sum_{u=1}^{N_h} k\left(\left\| \frac{Y_i - Y_0}{h} \right\|^2\right)$$

1.3　目标特征相似性的判定

本文使用 Bhattacharyya 系数表征 $\boldsymbol{p}_u$ 与 $\boldsymbol{q}_u$ 的相似程度，表示为

$$\rho(y) = \rho[\boldsymbol{p}_u(y), \boldsymbol{q}_u] = \sum_{u=1}^{m} \sqrt{\boldsymbol{p}_u(y) \cdot \boldsymbol{q}_u} \tag{4}$$

Bhattacharyya 系数值在 0～1 之间。$\rho(y)$ 越大，表示候选目标与模板目标相似程度越高，Mean-shift 算法就是通过不断迭代，寻找最优的 y，使 Bhattacharyya 系数最大。对式(4)进行泰勒展开，则相似性函数可由式(5)近似表示。

$$\rho(\boldsymbol{p}_u(y), \boldsymbol{q}_u) \approx \frac{1}{2}\sum_{u=1}^{m} \sqrt{\boldsymbol{p}_u(y) \cdot \boldsymbol{q}_u} + \frac{C_h}{2}\sum_{i=1}^{N_h} w_i k\left(\left\| \frac{Y_i - Y_0}{h} \right\|^2\right) \tag{5}$$

式中

$$w_i = \sum_{u=1}^{m} \delta[l(X_i) - u] \sqrt{\boldsymbol{q}_u / \boldsymbol{p}_u(y)},\quad u \in \{1,2,\cdots,m\}$$

1.4　目标定位

通过对相似性函数求解最大值，可计算出候选目标新的位置

$$y_1 = \sum_{i=1}^{N_h} X w_i g\left(\left\| \frac{Y_i - Y_0}{h} \right\|^2\right) \Big/ \sum_{i=1}^{N_h} w_i g\left(\left\| \frac{Y_i - Y_0}{h} \right\|^2\right) \tag{6}$$

式中，$g(x) = -k'(x)$。判断是否达到终止条件：若满足 $\| y_1 - y_0 \| < \varepsilon$，则停止计算并返回当前目标位置信息，否则以 y_1 代替 y_0，重复 Mean-shift 算法寻找最佳候选目标位置，考虑实时性要求，最大迭代次数定为 20。

2　视觉显著性检测

图像视觉显著性体现了人类视觉系统对目标图像不同区域的重视程度[9]，根据人类视觉认知理论，人类能够从复杂场景中快速发现并分析显著区域。目标往往位于该显著

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

区域中[10]。针对图像显著性检测，文献[2]在 Itti 模型的基础上进行改进，提出一种生物视觉的显著性检测方法；文献[11]从频域分析图像，提出一种频率调整的图像显著性检测方法，检测整体效果较好。在实际靶场环境中，目标成像小，运动速度大，多处于离焦状态。视场中常存在自然场景和人造建筑干扰，目标区域显著性相对降低，文献[2]和文献[11]方法在实际靶场环境中检测效果一般。针对实际靶场环境，本文构建多尺度、多方向的 Log-Gabor 滤波器进行特征提取，结合高斯差分模型来模拟人类视觉系统，进行图像显著性检测。

2.1 显著性特征提取

二维 Log-Gabor 滤波器不产生非 0 直流分量，带宽不受限制且在高频区域进行拉伸，弥补了 Gabor 滤波器在高频区域表达不足的缺点，能够对图像中方向信息、空间位置和频率特性进行有效描述，并不受光照的影响[12]。二维 Log-Gabor 滤波器在频率域极坐标下的数学模型为

$$G(\omega,\theta)=\exp\left(\frac{-(\lg(\omega/\omega_0))^2}{2(\lg(\sigma_\omega/\omega_0))}\right)\exp\left(\frac{-(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \quad (7)$$

式中，ω 滤波器的径向坐标；ω_0 为中心频率；θ 为滤波器角度坐标；θ_0 为滤波器方向角。通过改变 θ_0，可以实现任意方向上的 2 维 Log-Gabor 滤波；σ_θ 确定方向带宽 B_θ，$B_\theta=2\sigma_\theta\sqrt{2\lg 2}$；$\sigma_\omega$ 确定径向带宽 B_ω，$B_\omega=2\sqrt{2\lg 2}\times|\lg(\sigma_\omega/\omega_0)|$。

为充分提取图像的显著性特征，构建多尺度、多方向的 Log-Gabor 滤波器进行特征提取。本文中带宽参数 σ_ω/ω_0 设置为 0.55，尺度比例设置为 2。滤波器采用 4 个方向均匀覆盖$[0,\pi]$的空间角度范围，并针对每个滤波器方向，均选取 4 个频率尺度，共构建 16 个 Log-Gabor 滤波器进行显著性检测。滤波后得到 4 组特征序列

$$\left\{\boldsymbol{F}_{i,\theta}\middle|\theta=0,\frac{\pi}{4},\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{4};i=1,2,3,4\right\}。$$

2.2 感受野扩大与特征融合

感受野是指视网膜上的一定区域，是视觉感知的基本单位[10]。随着感受野作用范围的扩大，大脑视皮层细胞对信息的处理能力逐步增强。本文采用文献[13]改进的高斯差分模型(difference of Gaussian，DoG)对第 2.1 节得到的 4 组特征序列进行感受野的扩大，模拟人类视觉机制，如式(8)所示。

$$\boldsymbol{F}'_{i,\theta}=|\boldsymbol{F}_{i,\theta}\cdot(1+\mathrm{DoG})-G_{in}| \quad (8)$$

式中，G_{in} 为抑制参数，对特征图数值范围进行限定。高斯差分模型如式(9)所示。

$$\mathrm{DoG}(\sigma_{ex},\sigma_{in})=\frac{c_{ex}}{2\pi\sigma_{ex}}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{ex}^2}\right)-\frac{c_{in}}{2\pi\sigma_{in}}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{in}^2}\right) \quad (9)$$

式中，c_{ex} 和 c_{in} 分别为增强系数和抑制系数，σ_{ex} 和 σ_{in} 为对应系数的标准差。

对 4 组特征序列的感受野扩大后进行线性融合，得到原始图像最终特征图 $\boldsymbol{F}$，如式(10)所示。

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{N}\sum\boldsymbol{F}'_{i,\theta},\left\{\left|\theta=0,\frac{\pi}{4},\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{2};i=1,2,3,4\right.\right\} \quad (10)$$

式中，N 为特征图个数。

自然场景干扰下的船舶目标显著性检测如图 1 所示，天空背景下的飞机目标显著性检测如图 2 所示。图 1 中由于存在较强的非目标干扰，文献[2]、文献[11]对船舶目标的显著性检测效果较差，误将干扰区域认为目标区域，本文算法在检测到干扰物的同时，克服其干扰，较完整地检测出弱小目标的显著性区域。图 2 为天空背景下亮度不均衡的飞机目标，文献[2]、文献[11]只检测出目标亮区域，目标完整性较差，而本文算法能够克服目标亮度差异，较完整地检测出目标区域，保持目标细节完整。通过比较可以看出，本文算法能够克服非目标区域干扰，保持目标区域完整性。

(a) 原图 (a) Original image　(b) 频率调整法特征图 (b) Frequency-tuned　(c) 改进Itti法特征图 (c) Improved Itti　(d) 本文方法特征图 (d) The proposed method

图 1 自然场景干扰下的船舶目标显著性检测

Fig. 1 Visual saliency of ship under the disturb of natural scene

(a) 原图 (a) Original image　(b) 频率调整法特征图 (b) Frequency-tuned　(c) 改进Itti法特征图 (c) Improved Itti　(d) 本文方法特征图 (d) The proposed method

图 2 天空背景下的飞机目标显著性检测

Fig. 2 Visual saliency of plane

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　结合视觉显著性的 Mean-shift 算法

光电经纬仪是望远系统，探测远距离目标时，目标与相机距离较远，在焦距不变的情况下，目标成像相对于整个视场较小，且光电经纬仪所用相机帧频较高，在相邻帧中，目标特性具有相似性。传统 Mean-shift 跟踪算法的跟踪窗内不可避免地存在背景像素，使目标定位出现偏差[7]，经过多帧累积导致目标跟踪失败。本文在传统 Mean-shift 跟踪算法的基础上，提出一种基于像素归属度加权的调焦窗口构建方法。该方法以 Mean-shift 算法迭代求得的目标质心为参考点，计算各像素的归属度，并对视觉显著特性图进行加权，与 Epanechnikov 核函数结合，构建自适应核函数，弱化背景像素及目标尺度的影响。

3.1　像素归属度

为避免将背景区域判定为目标区域，以图像像素与参考点像素间的归一化距离表示像素与目标的相邻度 $\boldsymbol{A}$。同时，光电经纬仪工作时目标与背景区分明显，在目标主体范围内，像素灰度变化较小，具有极高的相似性。利用图像灰度信息，构建如式(11)所示的二次型函数模拟像素灰度相似性 $\boldsymbol{S}$。

$$A(i,j)=1-\frac{D(i,j)}{D_{\max}},\ 1\leqslant i\leqslant M;1\leqslant j\leqslant N \tag{11}$$

式中，M、N 为图像的长和宽；$D(i,j)$ 为各像素与参考点的距离；$D_{\max}$ 为 $D(i,j)$ 的最大值。本文是以图像中心为坐标原点表示的，计算时应注意坐标转换。

$$S(i,j)=a\times I^2(i,j)+b\times I(i,j)+c \tag{12}$$

$$a=\begin{cases}\dfrac{-1}{(I_{\min}-I_{mmt})^2},\ I_{mmt}>\dfrac{I_{\min}+I_{\max}}{2}\\[2ex]\dfrac{-1}{(I_{\max}-I_{mmt})^2},\ I_{mmt}\leqslant\dfrac{I_{\min}+I_{\max}}{2}\end{cases} \tag{13}$$

$$b=-2aI_{mmt} \tag{14}$$

$$c=1+aI_{mmt}^2 \tag{15}$$

式中，$I(i,j)$ 为图像像素灰度值；$I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 为图像中最大和最小灰度值；I_{mmt} 为参考点灰度值。

综合考虑目标的距离相邻度和灰度相似度，构建像素归属度评判标准提取目标，避免单一评判标准造成误判。像素归属度体现了像素属于目标区域的概率，表达式为

$$\boldsymbol{E}=\lambda\cdot\boldsymbol{S}+(1-\lambda)\cdot\boldsymbol{A} \tag{16}$$

λ 的取值可由式(17)得出，经过 λ 的加权，既保证了参考点附近位置，灰度差异大的点在可能的目标区域范围内，同时将距参考点较远但灰度接近的点剔除出。

$$\lambda=\begin{cases}A(i,j)/(A(i,j)+S(i,j)),\ S(i,j)\geqslant 0.8\\ 0,\ S(i,j)<0.8\end{cases} \tag{17}$$

3.2　目标区域确定

光电经纬仪成像时，由于背景如云层、海面波浪、海面反射光及自然或人造景观(陆地或多目标等)的干扰，单独使用像素归属度确定目标区域，会造成目标区域过大；而单独使用视觉显著特征图则会造成目标定位失败。为解决该现象同时降低计算量，首先使用像素归属度进行目标区域的粗检测，得到较大的目标区域，如式(18)所示，然后该目标区域进行视觉显著性检测，构建以归属度加权的视觉显著特性图 $\boldsymbol{H}$，进行目标区域的精细检测，得到精确的目标区域，如式(19)所示。

$$E(i,j)=\begin{cases}E(i,j),\ E(i,j)\geqslant th\\ 0,\ E(i,j)<th\end{cases} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{E} \tag{19}$$

式中，th 为利用像素归属度进行目标区域粗检测时设定的阈值，低于阈值则表明该像素为背景像素，高于阈值则表明该像素可能为目标像素，经大量实验发现，当 $th\in(0.90,0.95)$ 时能够完整检测出目标区域，同时克服背景区域及非目标干扰。本文中选取 $th=0.93$。

对于构建的归属度加权的视觉显著特性图，当 $H(i,j)$ 大于设定的阈值时，认为该像素属于目标区域。同时将图像进行二值化，突出目标区域。

$$H'(i,j)=\begin{cases}1,\ H(i,j)\geqslant\sum H/num\\ 0,\ H(i,j)<\sum H/num\end{cases} \tag{20}$$

式中，num 为视觉显著特性图 H 的非零像素个数。$H'(i,j)=1$ 表明该点像素为目标像素，否则为背景像素。

4　对角邻域法构建矩形调焦区域

为方便后续调焦，应建立矩形目标区域并构建调焦窗口。在目标二值图中，值为 1 的像素为有效像素，构成目标，值为 0 的为无效像素，构成背景，目标与背景相邻的有效像素构成标边界。目标边界的不规则是由边界像素对角邻域中存在其他边界像素造成的。因此，本文提出基于对角邻域的边界扩展法构建矩形调焦窗口。

提取二值化后的目标区域边界轮廓 L，假设 P 为边界上一点，其对角邻域如图 3 所示。检测 P 点的对角邻域中是否存在有效像素，假设 A 为有效像素，将 A 与 P 相邻的无效像素有效化，并添加到预处理点序列 G 中，对预处理点序列 G 进行迭代操作，直至序列 G 为空，最终得到矩形边界，如图 4 所示。

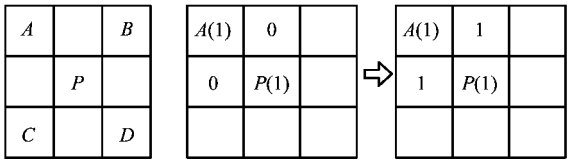
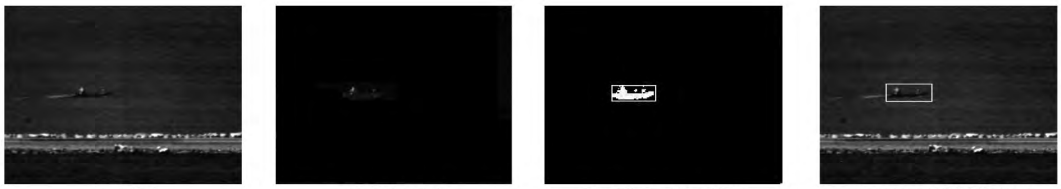


图 3　对角邻域　　图 4　对角邻域法边界扩展

Fig. 3　Diagonal area　　Fig. 4　Boundary extension

当存在多个矩形区域时，选择参考点所在的矩形区域作为调焦窗口。调焦窗口大小及位置确定后，针对调焦窗口内的原始灰度图像利用调焦图像评价算法计算调焦评价值，进行调焦操作。目标区域所示及调焦窗口确定如图 5 所示。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 原图 (a) Original image　(b) 目标区域 (b) Object area　(c) 目标区域二值图 (c) Binary image of object area　(d) 目标区域调焦窗口 (d) Focus window of object area

图 5　目标区域及调焦窗口确定

Fig. 5　The creation of object area and focus window

结合 Epanechnikov 核函数及目标区域二值图，为 Mean-shift 算法构建自适应核函数，如式(21)所示。从自适应核函数的构建过程可以看出，核函数带宽与目标的大小一致，同时背景像素的自适应核函数权值为 0，而目标区域像素的权值与 Epanechnikov 核函数值相同。因此通过构建自适应核函数，自适应目标尺度变化，突出目标区域的同时，弱化了背景像素对跟踪结果的影响。

$$k_{new}\left(\left\|\frac{Y_i-Y_0}{h}\right\|^2\right)=k\left(\left\|\frac{Y_i-Y_0}{h}\right\|^2\right)\cdot \boldsymbol{H}' \quad (21)$$

结合自适应核函数构建目标区域直方图对目标建模，改进的 Mean-shift 算法目标特性可描述为

$$\boldsymbol{p}_u(y)=C_h\sum_{i=1}^{N_h}k_{new}\left(\left\|\frac{Y_i-Y_0}{h}\right\|^2\right)\times\delta[b(Y_i)-u] \quad (22)$$

本文算法整体流程如图 6 所示，对第一帧图像进行手动选取目标，后续图像利用上帧目标位置进行像素归属度计算及显著性检测，确定目标区域并构建调焦窗口，同时为 Mean-shift 算法构建自适应核函数，弱化背景像素干扰。Mean-shift 算法以灰度直方图为特征对目标进行建模，通过不断迭代确定当前目标中心位置。

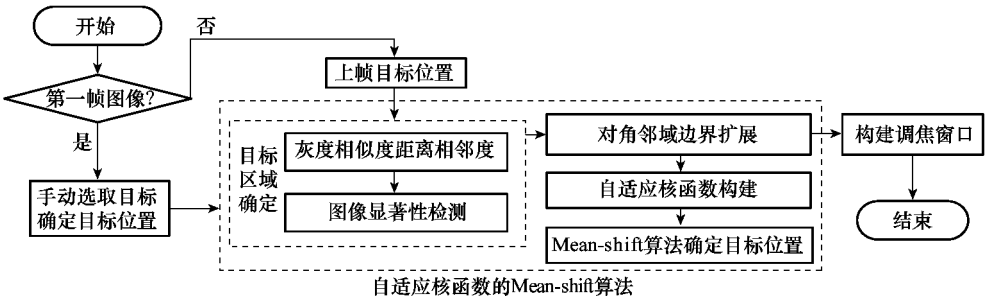


图 6　算法流程图

Fig. 6　The flowchart of the proposed method

本文的重点在于构建合适的调焦窗口，为后续的调焦工作提供有效的目标区域。当目标处于部分遮挡或者完全遮挡状态时，进行调焦的图像质量评价判据与非遮挡状态下的判据没有比较的意义，此时需要停止调焦状态。本文利用目标处于遮挡状态时，目标 Bhattacharyya 系数显著降低的性质判定目标是否遮挡。当目标重新出现在视场中时，再次构建调焦窗口，此时目标处于非遮挡状态。由于遮挡前后，目标大小与目标特性接近，Bhattacharyya 系数较大。首先以显著性特征图确定可能的目标区域并通过目标区域面积进行筛选，然后计算各区域与遮挡前目标区域的 Bhattacharyya 系数。通过判定 Bhattacharyya 系数最大值来判断目标是否远离遮挡。

6　实验结果与分析

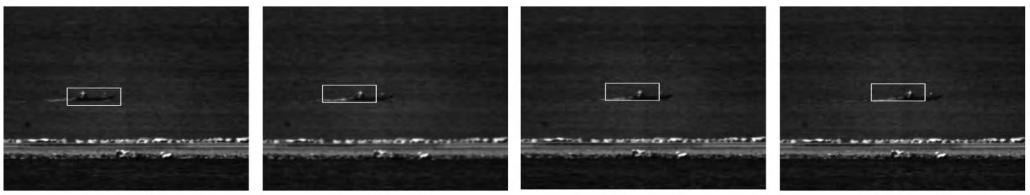
为验证本文算法在光电经纬仪上的有效性和可靠性，在某靶场进行了大量实验，实验平台为某型号光电经纬仪。在内存为 8 GB，CPU 为 Intel(R)Core(TM)i5-4210u@2.7 GHz 的工控机上结合 Opencv 库进行程序设计，程序运行环境为 VC2010。实验中以靶场中常见的船舶和飞机为目标进行调焦窗口构建，并与文献[2]视觉感知的调焦窗口构建方法进行对比，实验图像大小均为 720 pixel×576 pixel。

实际靶场任务中，光电经纬仪视场中常会存在自然场景或人造建筑，对构建调焦窗口造成干扰。第 1 组实验针对场景中存在人造建筑的船舶目标，本文算法与传统 Mean-shift 进行比较。实验所用图像为光电经纬仪保持方位、俯仰不变下记录的视频数据。传统 Mean-shift 跟踪结果如图 7 所示。由于船舶目标与海洋背景灰度特性相似并存在海杂波的干扰，传统 Mean-shift 的跟踪窗口产生较大偏差，不能完整容纳目标，并向船尾移动。本文算法通过 Mean-shift 算法获得目标大体位置，结合像素归属度及图像显著性，克服背景干扰，跟踪窗口能够完整容纳目标，跟踪效果较好，如图 8 所示。

实验中由于视场中只有船舶位置在变化，而背景以海波和人造建筑为主。对航行中的船舶进行调焦窗口构建实验，如图 9 所示。海杂波的及人造建筑的存在，对调焦窗口的构建造成干扰。文献[2]以视觉显著性最高的区域为调

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

焦窗口，而在本实验中，人造建筑显著性最高，导致调焦窗口构建失败。实验表明，本文算法通过 Mean-shift 算法获得目标大体位置，结合像素归属度及显著性，能够克服其他非目标物体的干扰，较准确地提取目标，构建调焦窗口。



(a) 第1帧
(a) Frame 1

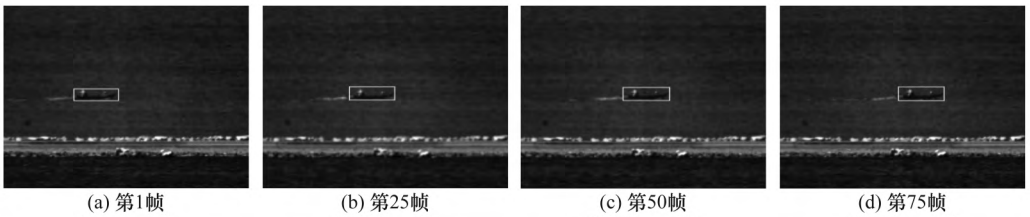
(b) 第25帧
(b) Frame 25

(c) 第50帧
(c) Frame 50

(d) 第75帧
(d) Frame 75

图 7　传统 Mean-shift 跟踪效果

Fig. 7　Tracking results using traditional Mean-shift



(a) 第1帧
(a) Frame 1

(b) 第25帧
(b) Frame 25

(c) 第50帧
(c) Frame 50

(d) 第75帧
(d) Frame 75

图 8　本文方法跟踪效果

Fig. 8　Tracking results using proposed method

(a) 轻度离焦时本文方法效果
(a) Focus window creation under light-defocus by proposed method

(b) 深度离焦时本文方法效果
(b) Focus window creation under deep-defocus by proposed method

(c) 轻度离焦时文献[2]方法效果
(c) Focus window creation under light-defocus by method in Ref [2]

(d) 轻度离焦时本文方法特征图
(d) Feature map under light-defocus by proposed method

(e) 文献[2]方法提取的特征图
(e) Feature map under light-defocus by method in Ref [2]

图 9　船舶目标构建调焦窗口

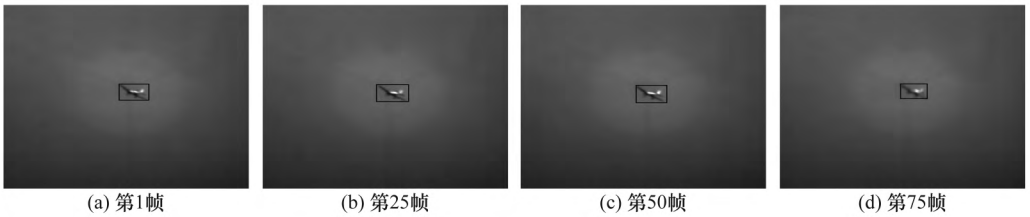
Fig. 9　Focus window for ship

第 2 组实验以光电经纬仪最常见的飞机目标进行实验。飞机目标特点是速度快、目标小，离焦现象明显。在光电经纬仪实际任务中，目标常常出现明暗分布。本组实验针对高空飞行的靶机，利用本文算法进行跟踪并构建调焦窗口。实验中当飞机进入光电经纬仪大视场捕获相机视场后，调节单杆控制经纬仪，使目标位于捕获相机视场中心，此时目标也将位于小视场跟踪相机视场中心。手动选取目标进入自动跟踪模式，实验结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出，本文算法的跟踪窗口完全容纳目标，进行有效跟踪。自动跟踪模式下，本文算法将靶机相对于视场中心的脱靶量实时发送给伺服控制系统，进而调节光电经纬仪，保持靶机始终在视场中心区域，实现对运动目标的实时跟踪。

在本组实验中，由于目标在高空飞行，非目标干扰较小。以实验中的轻度、重度离焦飞机为目标，进行调焦窗口构建实验，如图 11 所示。对亮度不均衡的飞机目标，文献[2]只

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

检测出目标亮区域，目标完整性较差。而本文算法能够克服目标亮度差异，较完整地检测出目标区域，保持目标细节完整。通过比较可以看出，本文算法能够克服非目标区域干扰，保持目标区域完整性。



(a) 第1帧
(a) Frame 1

(b) 第25帧
(b) Frame 25

(c) 第50帧
(c) Frame 50

(d) 第75帧
(d) Frame 75

图 10　本文方法对飞机目标的跟踪效果

Fig. 10　Tracking results using proposed method

(a) 轻度离焦时本文方法效果
(a) Focus window creation under light-defocus by proposed method

(b) 深度离焦时本文方法效果
(b) Focus window creation under deep-defocus by proposed method

(c) 轻度离焦时文献[2]方法效果
(c) Focus window creation under light-defocus by method in Ref [2]

(d) 轻度离焦时本文方法特征图
(d) Feature map under light-defocus by proposed method

(e) 文献[2]方法提取的特征图
(e) Feature map under light-defocus by method in Ref [2]

图 11　飞机目标构建调焦窗口

Fig. 11　Focus window for plane

第 3 组实验如图 12 所示，当目标被遮挡时，本文算法构建的调焦窗口。图 12(a)为遮挡前的调焦窗口，图 12(b)为遮挡中的目标。图 12(c)为遮挡后构建的调焦窗口。图 13 为本次实验中的 Bhattacharyya 系数，目标从开始遮挡到远离遮挡 Bhattacharyya 系数都较低的，此时调焦状态停止，不构建调焦窗口。实验表明本文算法在目标重新出现在视场中时，能够快速定位目标，构建调焦窗口。

(a) 遮挡前
(a) Before covered

(b) 遮挡中
(b) Covered

(c) 遮挡后
(c) After covered

图 12　目标遮挡前后构建调焦窗口

Fig. 12　Focus window creation for object before and after covered

针对实验 1 中的船舶目标进行本文算法、传统 Mean-shift 算法及文献[2]视觉感知方法的耗时进行平均值统计，如表 1所示。文献[2]视觉感知方法是对整幅图像进行显著性检测，耗时相对较长。本文算法通过像素归属度进行目标区域粗检测得到相对较大的目标区域，再对其进行显著性检测，检测区域缩小，算法耗时明显降低。实验中传统 Mean-shift 算法不需进行显著性检测，但迭代次数比本文算法多，耗时比本文算法略低，但跟踪精度较差。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

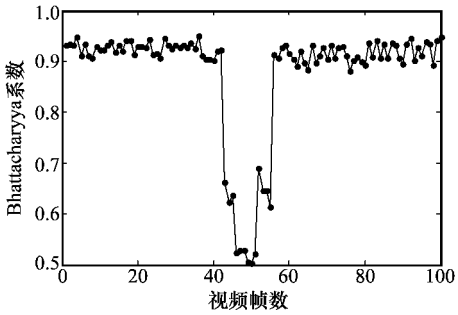


图 13　目标遮挡前后 Bhattacharyya 系数

Fig. 13　Bhattacharyya coefficient for object before and after covered

表 1　算法耗时比较

Table 1　Comparison of computation time for different method　　ms

算法	文献[2]	传统 Mean-shift	本文方法
耗时	50.7	16.4	18.7

7　结　论

针对光电经纬仪自动调焦中的调焦窗口构建问题，结合 Mean-shift 算法和视觉显著性检测，提出了一种自适应目标变化的动态调焦窗口构建方法。该方法通过多尺度、多方向的 Log-Gabor 滤波器和基于高斯差分模型来模拟人类视觉系统，进行图像显著性检测。以 Mean-shift 跟踪算法获取的目标中心为参考点，计算图像像素归属度，得到归属度加权的视觉显著特性图，进而提取目标构建调焦窗口并更新 Mean-shift 算法目标模型。通过在某型号经纬仪上大量实验，该方法能够有效克服目标运动与背景的干扰，对目标进行有效跟踪，构建位置准确、大小合适的调焦窗口，720 pixel×576 pixel 大小的图像耗时小于 20 ms，满足经纬仪实时性需求。

参考文献：

[1] Mo C H, Liu B, Ding L, et al. A gradient threshold auto-focus algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 323-327. (莫春红, 刘波, 丁璐, 等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 323-327.)

[2] Liu X C, Wu Z Y, Huang D T, et al. Designing of focus window combined with visual perception[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 191-198. (刘雪超, 吴志勇, 黄德天, 等. 结合视觉感知的调焦窗口构建[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 191-198.)

[3] Liang M H, Wu Z Y, Chen T. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12): 3016-3021. (梁敏华, 吴志勇, 陈涛. 采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3016-3021.)

[4] Hu T, Chen S Z, Liu G D, et al. Algorithm of selecting the optimal focusing region[J]. *Optical Technique*, 2005, 32(6): 851-854. (胡涛, 陈世哲, 刘国栋, 等. 图像法自动调焦的最佳调焦区域选择算法[J]. 光学技术, 2005, 32(6): 851-854.)

[5] Lv H Y, Liu Y, Xue X C, et al. Intelligent focusing method for the remote sensing cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1262-1265. (吕恒毅, 刘杨, 薛旭成, 等. 遥感相机的智能调焦方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1262-1265.)

[6] Zhang L, Jiang W, Gao Z. Automatic focusing region selection algorithm based on first order of digital image[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 163-166. (张乐, 姜威, 高赞. 数字图像一阶矩的自动聚焦区域选择算法[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 163-166.)

[7] Xue C, Zhu M, Chen A H. Robust object tracking based on improved mean-shift algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 234-239. (薛陈, 朱明, 陈爱华. 鲁棒的基于改进 mean-shift 的目标跟踪算法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 234-239.)

[8] Liu Q, Tang L B, Zhao B J, et al. Improved mean shift target tracking algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(6): 1918-1923. (刘晴, 唐林波, 赵保军, 等. 改进的 mean shift 目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1918-1923.)

[9] Song X R, Wu Z Y. Unsupervised detection of image object with any class[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 160-168. (宋修锐, 吴志勇. 图像通用目标的无监督检[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 160-168.)

[10] Hu D K. The Research on technology of image understanding based on biological visual perception[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (胡德昆. 基于生物视觉感知机制的图像理解技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.)

[11] Achanta R, Hemami S, Estrada F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]// *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1597-1604.

[12] Lu, Z K, Yu Z M. Multi-focus image fusion based on adaptive localized Log-Gabor engery[J]. *Acta Elecctronica Sinica*, 2013, 41(1): 199-205. (卢振坤, 玉振明, 基于自适应局部 Log-Gabor 能量的多聚焦图像融合[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 199-205.)

[13] Itti L, Koch C. Feature combination strategies for saliency-based visual cortical filters[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2001, 10(1): 161-169.

作者简介：

王冠军(1987-)，男，博士研究生，主要研究方向为图像处理与计算机视觉。

E-mail: wangguanjun198711@163.com

吴志勇(1965-)，男，研究员，博士研究生导师，主要研究方向为光电测控设备总体技术、视频调光调焦技术和光纤通讯技术。

E-mail: wuzy@ciomp.ac.cn。

云海姣(1987-)，女，博士研究生，主要研究方向为图像增强。

E-mail: yunhaijiao2011@126.com

刘雪超(1985-)，女，讲师，博士，主要研究方向为图像处理与计算机视觉。

E-mail: chaochao27819@126.com

梁敏华(1972-)，男，副研究员，博士，主要研究方向为图像处理与计算机视觉。

E-mail: lmhhlm@sina.com

杨　华(1962-)，女，高级工程师，主要研究方向为图像处理与计算机视觉。

E-mail: yanghua@sina.com

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net