

基于自适应邻域双边滤波的点目标检测预处理算法

曹 瑛 李志永 卢晓鹏 邹谋炎

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文通过分析点目标的成像原理, 提出一种基于自适应邻域时空双边滤波的点目标检测预处理算法。算法针对每个像素建立自适应邻域, 对不同类的邻域分别定义其定义域和值域势函数的乘积为滤波模板, 并通过限制自适应邻域的大小加快了算法速度。与固定邻域的空域双边滤波算法和时空双边滤波算法相比, 该文算法能够快速、有效去除噪声, 同时增强点目标和背景的对比度。

关键词: 点目标检测; 预处理; 时空双边滤波; 自适应邻域; 势函数

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1909-04

A Preprocessing Algorithm of Point Target Detection Based on Temporal-Spatial Bilateral Filter Using Adaptive Neighborhoods

Cao Ying Li Zhi-yong Lu Xiao-peng Zou Mou-yan

(Institute of Electronics China Academy of Science, Beijing 100190, China)

(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: By analyzing imaging theories of point target, a preprocessing algorithm of point target detection based on temporal-spatial bilateral filter using adaptive neighborhoods is presented. The algorithm establishes an adaptive neighborhood for the given pixel, and a size limitation is added to the adaptive neighborhood to accelerate the algorithm. Filter template is obtained by multiplying the potential function in the domain and the potential function in the range of different neighborhoods. Compared with spatial bilateral filtering algorithm and temporal-spatial bilateral filtering algorithm using fixed neighborhoods, this preprocessing algorithm removes noise and enhances the contrast between point target and background efficiently and rapidly.

Key words: Point target detection; Preprocessing; Temporal-spatial bilateral filtering; Adaptive neighborhood; Potential function

1 引言

低信噪比运动点目标检测是卫星遥感、防空预警以及导弹制导等领域信息处理的核心技术之一。为了抑制背景和噪声的影响, 提高点目标图像信噪比, 从而提高目标检测概率, 需要对点目标图像进行预处理。图像预处理对后续目标检测与跟踪工作有着重要意义。

目前常用的点目标图像预处理方法主要采用非线性滤波技术^[1-3], 这主要是点目标的类脉冲噪声特性和非线性滤波器在滤除脉冲噪声和保护图像细节信息方面的优异性能所决定的。双边滤波^[4-6]是数字图像非线性滤波的代表, 在处理邻域中像素时综合考虑距离上的邻近关系和灰度上的相似性, 通过对二者的组合自适应地滤波后得到平滑图像, 传统的空域双边滤波是基于高斯滤波器提出的, 平滑噪声的效果很好, 直接用于点目标图像时, 无法区分噪声和点目标, 容易噪声目标丢失, 文献[6]将双边滤波扩展到时空域, 有效

地增强了点目标, 但是采用的是固定的三维邻域, 计算量比较大, 难以满足实时性要求。

本文针对低信噪比图像中运动点目标检测问题, 提出一种自适应邻域时空双边滤波预处理算法, 利用像素点的局部信息进行模糊分类, 基于每个像素确定自适应的邻域, 把双边滤波自适应地扩展到时空域相结合的三维空间中, 同时根据势函数的概念定义了基于距离邻近度和灰度相似性的双边滤波模板。本文算法融合了双边滤波技术和自适应邻域技术的优势, 快速、有效去除噪声, 同时保持图像细节, 增强背景和背景对比度。实验结果表明本文算法对点目标图像预处理的效果明显优于传统算法。

2 时空双边滤波理论

双边滤波(bilateral filtering)是一种非线性的、非迭代的、局部的和简单的滤波算法, 具有很好的边缘保持特性。双边滤波的特点是处理相邻各像素值时, 不仅考虑到距离上的邻近关系, 同时考虑灰度上的相似性, 通过对二者的非线性组合, 自适应地滤波。

对图像序列 $I(x, y, t)$ 进行时空双边滤波可以表示为

$$F(x, y, t) = k^{-1} \sum_{(\xi, \eta, \tau) \in \Omega_{(x, y)} \times T_{(t)}} I(\xi, \eta, \tau) W(\xi, \eta, \tau; x, y, t) \quad (1)$$

其中 $F(x, y, t)$ 是滤波输出的图像, $T_{(t)}$ 是以当前图像采样点 t 为中心的时间邻域, $\Omega_{(x, y)}$ 是以点 (x, y) 为中心的空间邻域, k 为归一化系数。

加权系数

$$W(\xi, \eta, \tau; x, y, t) = d((\xi, \eta, \tau), (x, y, t)) g(I(\xi, \eta, \tau), I(x, y, t)) \quad (2)$$

$d((\xi, \eta, \tau), (x, y, t))$ 和 $g(I(\xi, \eta, \tau), I(x, y, t))$ 分别为点 (ξ, η, τ) 与几何中心 (x, y, t) 的距离邻近度和像素灰度相似性函数。

3 自适应邻域时空双边滤波预处理算法

3.1 计算空间邻域

设种子像素为图像序列任一帧上任一点 (x, y) 处的像素, 根据点目标运动速度选取空间邻域 $\Omega_{(x, y)}$ 。设点目标在序列图像帧间最大位移为 V 像素/帧, 定义单帧图像上空间邻域为

$$\Omega_{(x, y)}(i, j) = \{x - w_s \leq i \leq x + w_s, y - w_s \leq j \leq y + w_s\} \quad (3)$$

其中 $w_s = V + 1$ 。空间邻域滤波窗口大小为 $(2w_s + 1) \times (2w_s + 1)$ 个像素。

3.2 空域双边滤波模块

仅进行空域双边滤波时, 式(2)改写为

$$W(\xi, \eta; x, y) = d((\xi, \eta), (x, y)) g(I(\xi, \eta), I(x, y)) \quad (4)$$

本文算法中, 空域滤波时 $d((\xi, \eta), (x, y))$ 和 $g(I(\xi, \eta), I(x, y))$ 均取为移不变的高斯函数, 那么空域双边滤波器的加权系数为

$$W(\xi, \eta; x, y) = \exp \left[- \left(\left(\frac{\xi - x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{\eta - y}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right] \cdot \exp \left[- \frac{(I(\xi, \eta) - I(x, y))^2}{2\sigma_g^2} \right] \quad (5)$$

其中 σ_x 和 σ_y 是空域滤波时高斯函数的标准差, σ_g 是邻域中像素通过高斯函数进行滤波时的灰度标准差, 可以根据图像输入信噪比按照经验公式计算。

空域双边滤波可以表达为

$$F(x, y) = k^{-1} \sum_{(\xi, \eta) \in \Omega_{(x, y)}} I(\xi, \eta) W(\xi, \eta; x, y) \quad (6)$$

其中 k 为归一化系数。

3.3 自适应邻域模块

首先根据像素的灰度奇异性区分背景点。设种子像素为 $I(x, y, t)$, 根据式(4)计算当前帧上的空间邻域, 记为 Ω_t , Ω_t 内像素灰度均值 \tilde{I}_t , 根据目标在单帧图像中灰度的局部奇异性, 定义一个灰度奇异性系数

$$\alpha = \begin{cases} 1, & |I(x, y, t) - \tilde{I}_t| > g \\ 0, & |I(x, y, t) - \tilde{I}_t| \leq g \end{cases} \quad (7)$$

其中 g 是灰度奇异性的临界值, 与图像输入信噪比 SNR_i 的经验公式为 $g = \text{SNR}_i \times \text{std}(I)$ 。为了降低漏检概率, 通常 g 的取值略小于公式计算结果。本文给出的公式在实际应用中可能会有出入, 如何更好的确定滤波参数 g 与图像信噪比的关系, 仍需进一步研究。同时指出, 基于灰度奇异性的模糊分类判断, 适用于信噪比大于 0 dB 的灰度图像。

如果对种子像素计算的结果 $\alpha = 0$, 那么认为种子像素属于背景的一部分, 为了避免在较平稳图像上重复计算大面积的自适应邻域, 对种子像素按式(6)定义进行空域双边滤波。

如果对种子像素计算的结果 $\alpha = 1$, 那么种子像素可能是目标点或高强度噪声, 要根据运动的时域相关性进行下一步的判断。

设图像序列的时域滤波窗口大小为 w_t , 在图像序列的第 $t + r$ ($-w_t \leq r \leq w_t, r \neq 0, t + r > 0$) 帧中以 (x, y) 为中心的邻域 Ω_{t+r} 内, 设 $p_{xy}(m, n)$ ($(m, n) \in \Omega_{t+r}$) 为任意点 $I(m, n, t + r)$ 的灰度值占邻域内总灰度值的比率, 即

$$p_{xy}(m, n) = \frac{I(m, n, t + r)}{\sum_{(p, q) \in \Omega_{t+r}} I(p, q, t + r)} \quad (8)$$

定义 $P(x, y)$ 为邻域 Ω_{t+r} 内各点灰度值占邻域总灰度值的比率 $p_{xy}(m, n)$ 的平方和, 即

$$P_{t+r} = \sum_{(m, n) \in \Omega_{t+r}} p_{xy}^2(m, n) \quad (9)$$

当且仅当 $p_{xy}(m, n)$ 对所有的 (m, n) ($(m, n) \in \Omega_{t+r}$) 都相等时, P_{t+r} 取最小值, 邻域内各点的灰度起伏越大, 其比率分布差距越大, P_{t+r} 就越大。

对种子像素的连续第 $t - w_t, t - w_t + 1, \dots, t + w_t - 1, t + w_t$ 帧图像上以 (x, y) 为中心的邻域 Ω_{t+r} 分别计算其 P_{t+r} ($-w_t \leq r \leq w_t, r \neq 0$) 值。定义灰度分布相似性系数

$$\beta = \begin{cases} 1, & |P_{t+r} - P_t| > \frac{10^{-p}}{(2w_s + 1)^2} \quad (-w_t \leq r \leq w_t, r \neq 0) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中参数 p 根据 P_t 的指数形式的指数量级确定。为了减少因目标点偶尔被噪声淹没现象造成的漏检, 本文选取 p 使得 10^{-p} 量级比 P_t 小一个量级。

如果对所有的 r , P_{t+r} 值均较 P_t 值有很大差别, $\beta = 1$, 则按式(6)定义进行空域双边滤波; 否则, 认为当前种子像素为候选目标点。

对认为是候选目标的种子像素, 作如下判断

$$\left. \begin{aligned} P_{t+r} &\geq \frac{1}{(2w_s + 1)^2}, & t+r \in T(t) \\ P_{t+r} &< \frac{1}{(2w_s + 1)^2}, & t+r \notin T(t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当图像序列中 P_{t+r} 值大于 P_t 时, 认为 Ω_{t+r} 与 Ω_t 具有相关性, 将双边滤波的邻域扩展到 Ω_{t+r} , 对 Ω_{t+r} 中与种子像素灰度接近的像素定义较大的加权系数, 这样就起到了增强目标的作用。

3.4 时空双边滤波模块

对候选目标点进行时空域双边滤波时, 对当前帧邻域 Ω_t 和邻帧邻域 Ω_{t+r} ($t+r \in T(t)$) 内像素分别处理。

首先定义距离邻近度函数^[6]

$$d = \begin{cases} 1, & (\xi, \eta, \tau) \in \Omega_t \\ a, & (\xi, \eta, \tau) \in \Omega_{t+r} \end{cases} \quad (12)$$

其中 a 是自定义的参数。

当前帧邻域内, 与种子像素灰度相似的点权值为 1, 其他为 0, 灰度相似性函数定义为

$$g_t = \begin{cases} 1, & |I(\xi, \eta, \tau) - I(x, y, t)| < g \quad ((\xi, \eta, \tau) \in \Omega_t) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中 g 为式(8)中定义的灰度阈值。

邻帧邻域内, 与 Ω_t 灰度均值 \bar{I}_t 相似的点权值为 1, 其他为 0, 灰度相似性函数定义为

$$g_{t+r} = \begin{cases} 1, & |I(\xi, \eta, \tau) - \bar{I}_t| < a\sigma_t \quad ((\xi, \eta, \tau) \in \Omega_{t+r}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中 σ_t 是 Ω_t 内像素的灰度方差。

时空双边滤波可以表达为

$$F(x, y) = \frac{\sum_{(\xi, \eta, \tau) \in \Omega_t} I(\xi, \eta, \tau) \times g_t}{\sum_{(\xi, \eta, \tau) \in \Omega_t} g_t} + \sum_{(\xi, \eta, \tau) \in \Omega_{t+r}} \prod_{t+r \in T(t)} (a \times g_{t+r}) \quad (15)$$

4 实验结果与分析

4.1 滤波效果对比

下面针对一个实际采集的 $128 \times 128 \times 200$ 的图像序列中的第 20 帧图像(图 1(a)), 添加信噪比 $SNR_i = 0\text{dB}$, 帧间位移 $V = 2$ 像素/帧, 尺寸为 1 个像素的点目标。用式(6)表示的空域滤波的方法进行图像预处理, 处理结果见图 1(b), 用文献[6]中固定邻域的时空双边滤波算法进行图像预处理, 处理结果见图 1(c)。用本文算法进行图像预处理, 其中式(5)中 $\sigma_x = \sigma_y = 3$, $\sigma_g = 10$, 式(10)中 $w_t = 2$, 式(12)中 $a = 2$, 处理结果见图 1(d)。图 1(b), 1(e), 1(h), 1(k)分别是图 1(a), 1(d), 1(g), 1(j)中目标所在行的像素值曲线, 图 1(c)、1(f)、1(i)、1(l)分别是图 1(a)、1(d)、1(g)、1(j)中选取的以目标点为中心的局部区域的放大图。

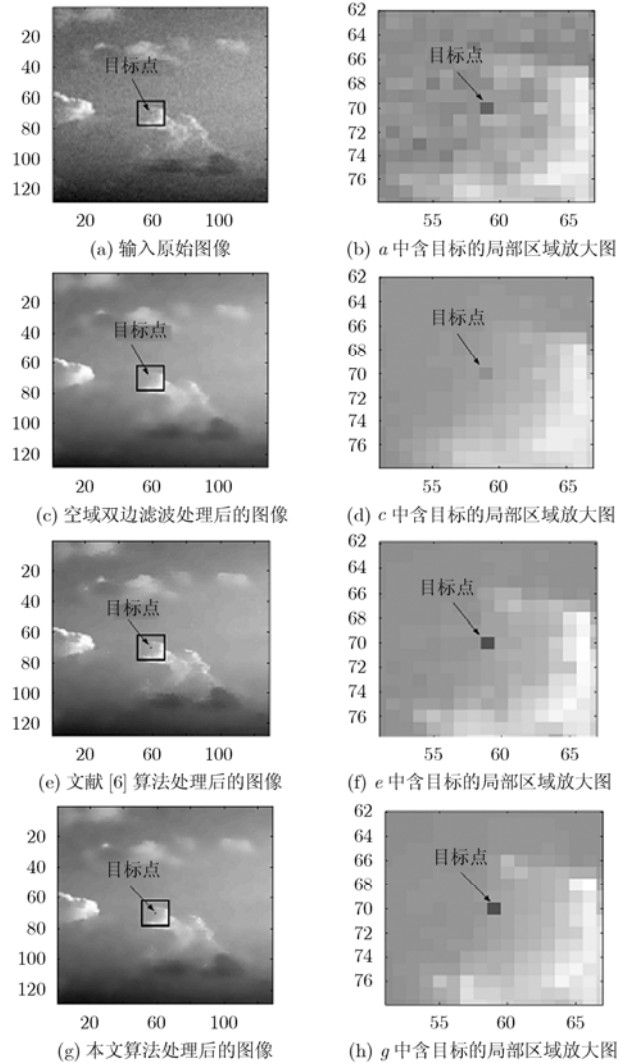


图 1 本文算法与空域双边滤波、文献[6]算法滤波效果比较

从图 1 可以看出, 时空双边滤波算法与传统空域双边滤波算法和文献[6]固定邻域的时空双边滤波算法处理效果进行比较, 可以看出传统的基于高斯滤波的双边滤波算法去噪效果很好, 可是由于点目标表现出的灰度差异被空间邻近度所掩盖, 滤波的结果无法保持点目标, 本文算法充分利用目标运动特征, 根据时域相关性区分出噪声点和目标点, 有效去除噪声的同时保持点目标; 文献[6]算法定义了固定的时空邻域和相应的滤波模板, 点目标保持效果很好, 但是造成的虚警较多, 本文算法自适应的进行高斯双边滤波或自定义的针对点目标特性的模板滤波, 平滑噪声和增强目标的效果很好, 而且虚警概率较低。

4.2 算法计算复杂度对比

文献[6]算法针对每一个像素都要进行三维邻域的计算, 计算量大, 本文算法通过控制自适应邻域的大小有效减少了计算量, 对于一个 $M \times N \times T$ 的图像序列, 其中 M, N 表示图像每行、每列像素的个数, T 表示图像序列帧数, 文献[6]算法处理, 所需的乘法运算量约为 $130 \times M \times N \times T$ 次, 所需

的加法运算量约为 $340 \times M \times N \times T$ 次, 所需的逻辑判断约为 $170 \times M \times N \times T$ 次, 本文算法处理, 选取空域滤波窗口大小为 $(2w_s + 1) \times (2w_s + 1)$ 像素, 所需的乘法运算量约为 $3.05 \cdot (2w_s + 1)^2 \times M \times N \times T$ 次, 所需的加法运算量约为 $3.07 \cdot (2w_s + 1)^2 \times M \times N \times T$ 次, 所需的逻辑判断约为 $1.6 \times M \times N \times T$ 次, 如果与文献[6]中空域窗口大小相同, 即 $w_s = 3$, 在 MATLAB6.5 平台下对同一个图像序列进行处理, 总计算时间约为文献[6]算法计算时间的 0.4 倍, 可见本文算法有效增强了实时性。

5 结束语

本文对含有运动点目标图像的预处理引入了自适应邻域时空双边滤波技术, 通过实验证明, 充分利用像素局部信息选取自适应邻域, 避免了在较平稳图像上重复计算大面积的邻域, 减少了计算量, 加快了算法速度, 并且结合了图像灰度信息和空间位置信息作为滤波加权系数的双边滤波方法, 使得点目标图像中的目标信息得到加强, 同时有效地去除噪声, 提高了图像信噪比。

参考文献

- [1] Fong Y S and Pomala-Roez C A. Comparison study of nonlinear filters in image processing applications [J]. *Optical Engineering*, 1990, 28(7): 749-760.
 - [2] Diani M, Baldacci A, and Corsini G. Joint striping noise removal and background clutter cancellation in IR naval surveillance systems [J]. *IEEE Proceedings Vision Image and Signal Process*, 2001, 148(6): 407-411.
 - [3] Nakashizuka M, Aoki K, and Nitta T. A simple edge-weighted image enhancement filter using wavelet scale products[C]. The 2004 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Hiroshima, Japan. 2004, 1: 25-28.
 - [4] Tomasi C and Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Bombay, India. 1998: 839-846.
 - [5] Michael Elad. On the origin of the bilateral filter and ways to improve it [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 10(11): 1141-1151.
 - [6] Pei Jihong, Lu Zongqing, and Xie Weixin. A method for IR point target detection based on spatial-temporal bilateral filter[C]. The 18th International Conference on Pattern Recognition, Hongkong, 2006, 3: 846-849.
- 曹 瑛: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为点目标检测与跟踪。
李志永: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为图像、视频处理技术。
卢晓鹏: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为视频跟踪、视频稳定化技术。
邹谋炎: 男, 1941 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号处理、图像处理理论和算法、无线宽带通信技术。