

358-362
④

人造目标识别的小波 Holder 数方法*

刘文子 朱光喜

TP391.41

(华中理工大学电子信息工程系, 湖北, 武汉, 430074)

摘要 从分形布朗运动的平均 Holder 数出发, 通过分析人造目标与自然场景相对深度的差异, 提出一种全新的基于小波 Holder 数相对深度的人造目标识别方法, 并给出了该方法用于人造目标识别的实例, 通过小波变换提高抗畸变及干扰能力, 并用两幅图像作更精确的估计及结果验证, 实验表明, 该方法是一种有效的人造目标识别方法。

关键词 目标识别, 分形布朗运动, 小波变换, Holder 常数。

引言

自然背景下人造目标(如飞机、舰船、坦克等)的识别是一个重要的研究课题^[1]。近年来人们研究得较多的方法是计算纹理的统计特征, 根据提取不同纹理的统计特征向量, 设计分类器来识别不同纹理。由于人造目标与自然景物在分形统计特征上存在较大差异, 通过检测不同纹理的差异可区分人造目标与自然场景。这些方法只考虑了纹理的统计特征, 没有考虑纹理的三维表面几何特征, 如物体的相对高度等。Pentland^[2]已经证明了自然界中大多数的自然纹理表面在一定的尺度范围内是满足各向同性的分形表面, 并且它们所映射成的灰度图像表面也是各向同性的分形, 但规则的几何体则不满足分形特征, 同时指明一个空间上各向同性的三维分形表面一定产生一个二维分形布朗图像, 反之, 一个二维分形布朗图像也对应一个三维分形布朗表面, 通过研究二维图像灰度, 一定能够获得相应的三维表面的某些性质, 如相对高度等。由于规则物体不是一个二维分形布朗图像, 则物体与自然场景的相对高度会产生一个阶跃, 本文提出了一种基于小波 Holder 数的人造目标识别方法, 把物体的纹理统计特征与三维表面几何特征相结合。由于三维分形布朗表面在不同的观察高度下 Holder 数满足一定的对数关系, 可以通过改变分辨率的方法来得到人造目标与自然场景的相对高度, 经过三维形态滤波^[3]和门限检查可识别人造目标与自然场景。

1 分形布朗表面相对高度的估计

设 $f(t)$ 是一个一维分形布朗运动 $fBM^{[4][5]}$, T 是时间间隔, $T-t, -t, \dots$, 令 $|\Delta f_i| = |f(t_i) - f(t_{i-1})|$, 则局部 Holder 常数为^[6] $a_i = \frac{\log |\Delta f_i|}{\log |T|}$, 平均 Holder 常数为 $a = \text{avg}(a_i)$, avg 表示取平均。

定理 1 若 Δf_i 取较小值, 则有 $a = H + [\log c - k] / \log T$, 其中 c, k 为常数, H 为分形参

* 国家自然科学基金(编号 69672014)资助项目
稿件收到日期 1998-12-15, 修改稿收到日期 1999-02-01

数,且 $E[f(t+T)-f(t)]^2=cT^{2H}$.

证明: $\Delta f=f(t+T)-f(t)$, 则 Δf 服从 $N(0, cT^H)$ 的高斯分布, Δf 的概率密度为

$$p(\Delta f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi cT^H}} \int_{-\infty}^{\infty} \log|z| \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{cT^H}\right)^2\right] dz.$$

令 $s = \frac{z}{cT^H}$, 则有

$$E[\log(\Delta f)] = H \log T \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds + \log c \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \log s \cdot \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds = H \log T + \log c - k.$$

定理 1 表明平均 Holder 数 α 和分形参数 H 之差与时间间隔 T 的对数成反比, 当 $T \rightarrow 0$ 时, $\alpha \rightarrow H$, α 反映了 $f(t)$ 的变化率, 类似于连续函数中的导数.

定理 2 如果 Δf 作用一个尺度变换 λ , 则 $\alpha_\lambda = H + \frac{[(1-H)\log\lambda + \log c - k]}{\log T}$, 证明如下: 设 $\hat{f}(t)$ 是 $f(t)$ 尺度变换后的函数, $\hat{f}(t+T) - \hat{f}(t) = \lambda \left[f\left(\frac{t}{\lambda} + \frac{T}{\lambda}\right) - f\left(\frac{t}{\lambda}\right) \right]$, 因 $f\left(\frac{t}{\lambda} + \frac{T}{\lambda}\right) - f\left(\frac{t}{\lambda}\right)$ 服从 $N(0, \lambda c \left(\frac{T}{\lambda}\right)^H)$ 的正态分布, 则方差为

$$\sigma(\hat{f}(t+T) - \hat{f}(t)) = \lambda c \left(\frac{T}{\lambda}\right)^H = \lambda^{1-H} c T^H.$$

由定理 1 得 $\alpha_\lambda = H + \frac{(1-H)\log\lambda + \log c - k}{\log T}$, 这里 $A = \frac{1-H}{\log T}$, $B = H + \frac{\log c - k}{\log T}$. 显然, 当 $\lambda=1$ 时, $\alpha_\lambda = \alpha$, 当 $T \rightarrow 0$ 时, $\alpha \rightarrow H$. 定理 2 表明当 T 给定, α_λ 是 $\log\lambda$ 的线性函数, $\alpha_\lambda = A \log\lambda + B$.

上述定理可推广至二维情况, 由于 λ 表示 $f(t)$ 的尺度变换, 相当于摄像机距物体的距离, 即物体表面相对的起伏, λ 是 α 的指数函数.

三维表面 S 必须满足下列条件, 才能进行正确估计: (1) S 必须是一个三维分形布朗表面; (2) S 必须是一个单一表面, 没有多个物体表面的相互遮挡; (3) S 上的光照均匀; (4) S 上的观察区域应与相机轴线垂直.

设相机获得的图像为 $I(x, y)$, 则对每一点 (x, y) 的局部 Holder 常数 $\alpha_i(x, y)$, 有

$$\alpha_i(x, y) = \frac{1}{N(\omega)} \sum_{(\Delta x, \Delta y) \in \omega} \frac{\log[I(x + \Delta x, y + \Delta y) - I(x, y)]}{\log|T|}.$$

这里 $\omega = \{(\Delta x, \Delta y); \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = T\}$ $N(\omega)$ 表示 ω 中点 $(\Delta x, \Delta y)$ 的个数. 取一个邻域 D , $\alpha_i(x, y)$ 即为点 (x, y) 的邻域 D 内各点的 $\alpha_i(x, y)$ 的平均值. 则 (x, y) 点的相对高度为

$$\lambda(x, y) = \exp\left(\frac{\alpha_i(x, y) - B}{A}\right). \quad (1)$$

当 $\lambda=1$, $\alpha_i=B$, B 表明 S 表面上相对距离的零参考点, 取 $B = \frac{1}{N(I)} \sum_{(x, y) \in I} \alpha_i(x, y)$, I 为整个图像. 根据文献[7]中 B 的性质可求出 H 值, 即可求出 A , 则可估计每一点的相对深度, 用此方法估计平均深度对噪声很敏感, 由于真实图像只是在一个小尺度范围符合 fBM, 则 D 不

能取太大,这也是减小估计误差的不利因素.

2 小波 Holder 数的相对深度估计法

设 $g_\lambda(t)$ 为 Haar 分析小波,则 $f(t)$ 的小波变换 $T_f(t, \lambda)$ 为

$$\begin{aligned} T_f(t, \lambda) &= \lambda^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) g_\lambda\left(\frac{\tau-t}{\lambda}\right) d\tau \\ &= \lambda^{-\frac{1}{2}} \left\{ \int_t^{t+\frac{1}{2}\lambda} f(\tau) d\tau - \int_{t-\frac{1}{2}\lambda}^t f(\tau) d\tau \right\} = \lambda^{-\frac{1}{2}} \int_t^{t+\frac{1}{2}\lambda} \left\{ f(\tau) - f\left(\tau + \frac{1}{2}\lambda\right) \right\} d\tau. \end{aligned}$$

对离散信号 $f(m): m=0, 1, \dots, M-1$, 有

$$T_f(m, x) = \lambda^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=m}^{m+\frac{1}{2}\lambda} \left[f(i) - f\left(i + \frac{1}{2}\lambda\right) \right] = \lambda^{-\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=m}^{m+\frac{1}{2}\lambda} f(i) - \sum_{i=m}^{m+\frac{1}{2}\lambda} f\left(i + \frac{1}{2}\lambda\right) \right].$$

这里 $T_f(m, x)$ 表示 m 处尺度 λ 范围内前半部分 $(m, \frac{1}{2}\lambda+m)$ 与后半部分 $(m+\frac{1}{2}\lambda, m+\lambda)$ 的均值之差, 当 $\lambda=2, T_f(m, 2) = \lambda^{-\frac{1}{2}} [f(m) - f(m+1)]$.

由 fBM 的性质^[7], fBM 的小波变换平均功率与尺度 λ 满足幂指关系. 则有 $E[T_f^2(t, \lambda)] = c \cdot \lambda^\beta, \beta = 2H+1, c$ 是与 H 有关的常数. 因为 $\Delta f = f(t+T) - f(t)$ 服从 $N(0, cT^H)$ 的正态分布, 则 $\Delta f_{\frac{1}{2}}$ 服从 $N(0, c(\frac{\lambda}{2})^H)$ 分布, 即 $\Delta f_{\frac{1}{2}}$ 服从 $N(0, c_1 \lambda^H)$ 的正态分布, $c_1 =$

$2^{-H} \cdot c T^H, T_f(m, \lambda) = \lambda^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=m}^{m+\frac{1}{2}\lambda} \Delta f_{\frac{1}{2}}$ 服从 $N(0, c_2 \lambda^H)$ 的正态

分布, $c_2 = 2^{-\frac{1}{2}} \cdot c_1 = 2^{-\frac{1}{2}-H} \cdot c$, 即 $T_f(m, \lambda)$ 也是 $fBM, T_f(m, \lambda)$ 类似于 Δf .

由定理 1 的证明过程可得到定理 3.

定理 3 设 $f(t)$ 是一维实函数, $T_f(t, \lambda)$ 是 $f(t)$ 在尺度 λ 的小波变换, 则 $f(t)$ 在 $t=t_0$ 时的局部小波 Holder 常数 r_t 定义为

$$r_t = \frac{\log |T_f(t, \lambda)|}{\log T}. \quad (2)$$

平均小波 Holder 常数 $r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$, 则相对高度

$$d = \exp\left(\frac{r_d - B}{A}\right). \quad (3)$$

这里 r_d 为邻域内的小波 Holder 数, $A = \frac{1-\beta}{\log \lambda}, B = \frac{1}{N(T)} \sum r_d(x, y)$, B 即为 $r_d(x, y)$ 在整幅图像中的平均值. 式(3)虽然由 Holder 小波分析得到, 实际中可推广至任意小波都适用.

3 小波 Holder 数用于人造目标识别

由于人造目标不满足分形布朗运动, 用式(3)估计的相对高度与自然场景的相对高度不

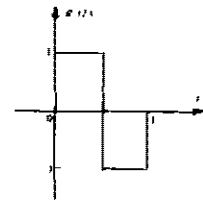


图 1 Haar 分析小波
Fig. 1 Haar analytical wavelet

连续,会产生一个阶跃,检测这个阶跃,可判定为人造目标.由于采用小波变换的方法,减小噪声对平均深度估计的干扰,使分类更准确,并克服用单纯的分形参数(如分形维数等)估计的小尺度问题,减小了分类重叠区.图 2 为海洋中的舰船,图 3 是估计的相对高度,可见相对高度存在一个跳变区,通过形态闭运算,平滑噪声,用阈值的方法很容易区分.图 4 为识别结果,虚边为错误检测的结果.图 5 为飞机掩盖在某种分形噪声下的情况,飞机与背景是不同的高斯分形噪声,图 6 是识别结果.

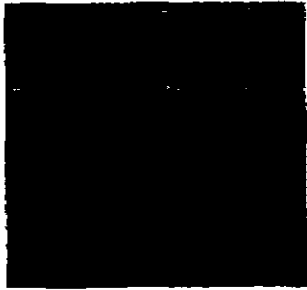


图 2 实际拍摄的
海洋中的舰船
Fig. 2 Source image of
ship on ocean



图 3 估计的相对高度
(经过形态滤波)
Fig. 3 The estimated relative height
(after morphology filter)

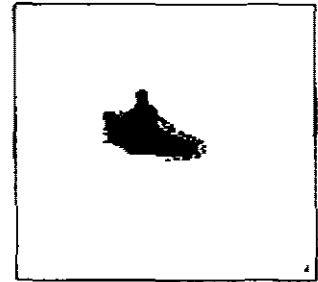


图 4 舰船估计结果
Fig. 4 The estimated
result of ship

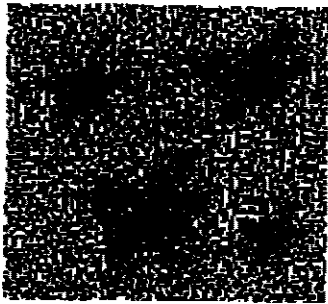


图 5 掩盖在分形噪声下的飞机图像
Fig. 5 Plane image with fractal noise

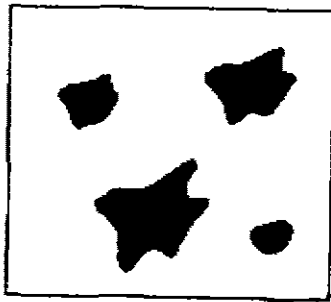


图 6 图 5 中飞机识别结果
Fig. 6 Plane recognition result of Fig. 5

如果要精确估计,可取同一地区不同尺度的两幅图,这可通过变焦方法拍摄同一地点两幅图像来实现,由定理 2, $\alpha_1 = H + \frac{-H \log \lambda + \log c - k}{\log c}$, 对 fBM , 尺度变换不影响 H 值,则 H 值不变,则 $\alpha - \alpha_1 = -H \frac{\log \lambda}{\log T}$, 得到

$$\lambda = \exp \left[\left(\frac{\alpha - \alpha_1}{H} \right) \log T \right] \quad (4)$$

这说明对自然场景估计的不同高度应满足公式(4),反之,人造目标的相对高度则不可能满足式(4),公式(4)给出估计相对高度的更严格方法.

4 结语

本文针对人造目标识别的困难提出一个基于小波 Holder 常数的人造目标分割方法,并用实际与模拟图像对该方法进行了验证性实验,实验结果表明该方法是可行的,通过对图像进行小波变换,提高抗干扰能力,并使图像经过小波变换后在更大尺度范围都满足 fBM 条件,利用不同分辨率下的图像,可进行更

精确的估计,并对估计结果进行验证.有关更复杂的场景和不同光照条件下的人造目标识别方法是今后研究的重点.

REFERENCES

- 1 Bhanu B. Automatic target recognition: state of the art survey. *IEEE Trans. on AES*, 1986, **22**(4): 364—379
- 2 Pentland A P. Fractal-based description of natural scene. *IEEE Trans on RAMI*, 1984, **6**(6): 661—674
- 3 LIU Wen-Yu, ZHU Guang-Xi. A new method of simulating focusing gradient based on fast stratified filtering on 3D image, *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (刘文予,朱光喜.基于三维图像快速分层滤波的聚焦梯度模拟方法,红外与毫米波学报), 1998, **15**(5): 357—362
- 4 Mandbrot B B, Van Ness J W. Fractional brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Rev.*, 1968, **10**(4): 422—436
- 5 Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory, *Physics D*, 1998, **31**(5): 277—283
- 6 James M. Characteristics of natural scenes related to the fractal dimension. *PAMI*, 1987, **9**(5): 620—627
- 7 LUO Hui-Guo, ZHU Yao-Ting, ZHU Guang-Xi, et al. *Acta Electronica Sinica* (罗会国,朱耀庭,朱光喜等.电子学报), 1994, **22**(7): 17—22

ARTIFICIAL TARGET RECOGNITION BASED ON WAVELET TRANSFORMATION AND HOLDER CONSTANT*

LIU Wen-Yu ZHU Guang-Xi

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract With the description of average Holder constant of fractional Brownian motion, and analyzing the different depth of 3D surface between the target and complex background, a novel method for artificial target recognition based on wavelet transformation and Holder constant was proposed. Examples of application of the algorithm to artificial target recognition were given. The anti-interference capability was improved by using wavelet transformation. More accurate localization can be attained by using two images in the same region by different scale. This method is suitable for identifying specific targets in a complex background.

Key words target recognition, fractional Brownian motion, wavelet transformation, Holder constant.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1998-12-15, revised 1999-02-01