

梯度水线的尺度空间

李毅 廖明 马颂德 卢汉清

(中国科学院自动化所模式识别实验室,北京 100080)

摘要 提出了一种在原始梯度水线划分约束下应用于图象灰度表面的层化变换。经此变换之后,在多尺度测地重建滤波下,不同尺度的梯度水线将存在严格的因果关系。在此基础上能够建立测地重建这种形态滤波器下的梯度水线的尺度空间,以及多尺度计算框架。作为它的一个应用例子,讨论了一种基于区域跟踪的序列图象分析方法。这种多尺度框架能有效提高算法的稳定性、可靠性和计算效率。

关键词 水线变换 形态梯度 测地重建 尺度空间 区域跟踪

0 引言

梯度水线变换^[1]作为一种有效的图象区域分割方法,其结果与图象中目标的实际结构有较好的对应性。在测地重建^[2]这种形态滤波器提出后,由于它能够随尺度的改变而逐步简化图象结构,从而解决了过分问题,使得梯度水线变换的实际应用前景更为广阔。然而考虑到稳定性、可靠性及计算效率方面的因素,迫切需要建立一种多尺度计算框架,这个计算框架的理论基础则是梯度水线的尺度空间。近期的许多文献都直接或间接地讨论了这个问题。

目前的问题是,简单地使用多尺度测地重建滤波器,以梯度水线作为图象特征不能够建立我们希望的尺度空间。不同测地重建尺度下的水线存在不同程度的漂移,这种漂移有时会严重破坏集水盆地不同尺度下的因果性。如果在原始形态梯度上进行测地重建,漂移基本上可以解决,但目前的共识是,这种重建缺乏实际的物理意义。因此,某种预处理成为关键的步骤。

出于上述考虑,本文提出了一种在原始形态梯度上的水线划分约束下的灰度层化变换。这种变换对应于形态梯度上 $\delta \rightarrow 0$ 的变换,因此在不同测地重建尺度下水线不会被改变,仅会被消去(如果尺度足够大),也就是说,经此变换后,随着尺度的改变将不会发生水线漂移,只会发生集水盆地的合并,而且合并也是具有一定的物理意义的。

1 多尺度测地重建下的形态梯度水线变换:基本定义

Vincent 等人通过所谓“模拟淹没”给出了水线的一种构造性定义,并提供了高效的算法^[1]。由于直接在灰度表面计算的水线与实际对象边界间的对应关系不是很好,他们又提出了在形态梯度上计算水线的想法,以及测地重建这种多尺度形态滤波器,即腐蚀重建下的开运算 γ_n^{rec} 和膨胀重建下的闭运算 $\varphi_n^{\text{rec}[2]}$ 。在文献[3]中 Jackway 曾试图建立梯度水线的多尺度框架,然而他使用的形态滤波器是膨胀 δ_n 和腐蚀 ϵ_n ,这两种滤波器会对灰度表面进行修改从而直接导致整体性的水线漂移,因此其应用存在很大的局限性。

梯度水线尺度空间的意义应当是随着形态滤波器尺度的增大,水线应逐渐消失,并且大尺度下集水盆地是小尺度下集水盆地的并集。从直观上说, γ_n^{rec} 能消去截面积小于一定门限的尖峰, φ_n^{rec} 能填平截面积小于一定门限的凹陷,但对其它的尖峰和凹陷不进行任何修改。随着尺度的增大,会有更多更大的尖峰和凹陷被消除,导致水线的消失和集水盆地的合并。因此它们是构造水线尺度空间的合适的滤波器,但这并不是说梯度水线在不同尺度下的严格因

果性能得到保证。在经测地重建后得到的形态梯度上计算的水线在不同尺度间会发生两种基本的漂移。文中将在对这两种漂移进行分析的基础上提出层化变换,并讨论由此构造的梯度水线尺度空间。首先我们给出一些形态变换的形式定义.有关细节和性质请参阅文献[2,4,5]。

腐蚀: $(\epsilon_n(f))(x) = \min\{f(x+y), y \in E_n\}$;

膨胀: $(\delta_j(f))(x) = \max\{f(x+y), y \in E_n\}$;

开: $\gamma_n(f) = \epsilon_n(\delta_n(f))$;

闭: $\varphi_n(f) = \delta_n(\epsilon_n(f))$;

尺度为1的测地膨胀: $\delta^{(1)}(f, r) = \min\{\delta_1(f), r\}$;

尺度为1的测地腐蚀: $\epsilon^{(1)}(f, r) = -\delta^{(1)}(-f, -r)$;

膨胀测地重建: $\gamma^{\text{rec}}(f, r) = \delta(f, r)$;

腐蚀测地重建: $\varphi^{\text{rec}}(f, r) = \epsilon(f, r)$;

腐蚀测地重建下的开: $\gamma_n^{\text{rec}}(f) = \gamma^{\text{rec}}(\epsilon_n(f), f)$;

膨胀测地重建下的闭: $\varphi_n^{\text{rec}}(f) = \varphi^{\text{rec}}(\delta_n(f), f)$;

测地重建变换的尺度是形态结构元素 E_n 的尺寸,它一般是个圆盘。

标零比较:

$$\text{cmp}(f(x), g(x)) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x) = g(x); \\ 0, & \text{if } f(x) \neq g(x). \end{cases}$$

标零重建:

$$Z(f(x), g(x)) = \begin{cases} f(x), & \text{if } g(x) \neq 0; \\ 0, & \text{if } g(x) = 0. \end{cases}$$

原则上形态梯度算子 ∇_m 定义为

$$\nabla_m(f) = \delta_1(f) - \epsilon_1(f) \quad (1)$$

还有其它形式的形态梯度算子^[6],它们进一步考虑了方向、连续性等因素。从概念上讲,所有这些算子都是用来衡量灰度表面形态变化的程度。

在8连通数字网格上,灰度图象 $I(M, N)$ 上的水线变换 WS 可以表示为: $WS(I) = \{CB, WA\}$ 。这里 WA 是水线弧,它是 I 的局部连通子集, CB 是集水盆地的集合。根据水线变换的性质,有:

(1) $CB = \{CB_i | i = 1, \dots, p\}$, p 是 I 的局部极小值区域的数目, CB_i 是集水盆地;

(2) $I = (\cup CB_i) \cup WA$ 。水线弧是集水盆地的外边界。为表述方便起见,我们使集水盆地包括它的外边界,从而水线变换简化为:

$$WS(I) = \{CB_i | i = 1, \dots, p\}, I = \cup CB_i,$$

因此

$$WA = \cup_{ij} (CB_i \cap CB_j)$$

由此,水线变换根据图象极小值区域 R_{\min} 的分布给出了图象的一个划分,把它写为

$$R_{\min}(I) = \cup_{1 \leq i \leq p} N_i$$

这里 N_i 是独立的极小值区域。根据淹没算法给出的水线定义,有

$$CB_i = \Gamma Z_I(N_i)$$

其中 ΓZ_I 是所谓的测地分水变换,因此对于 CB_i, N_i 是它唯一的极小值区域。

讨论梯度水线的尺度空间时,使用的多尺度形态滤波器 Φ_n 是腐蚀重建下的开运算和膨胀重建下的闭运算的组合,即:

$$\Phi_n(I) = \gamma_n^{\text{rec}}(\varphi_n^{\text{rec}}(I)) \quad (2)$$

尺度 n 下的特征(集水盆地)提取算子为

$$WS_n^{\nabla}(I) = WS(\nabla_m(\Phi_n(I))) = \{CB_{i(n)}^{\nabla} | 1 \leq i \leq p_n\} \quad (3)$$

每个 $CB_{i(n)}$ 包含一个形态梯度的极小值区域(梯度0),而每个梯度极小值区域对应原始图象的一个极值区域,假设其灰度为 $g_{i(n)}$,所以(3)可以写作

$$WS_n^{\nabla}(I) = WS(\nabla_m(\Phi_n(I))) = \{CB_{i(n)}^{\nabla}(g_{i(n)}) | 1 \leq i \leq p_n\} \quad (3')$$

梯度水线的尺度因果性的表述是

$$CB_{i(n)} = CB_{j_1(m)} \cup CB_{j_2(m)} \cup \dots \cup CB_{j_k(m)},$$

$$1 \leq j_1, j_2, \dots, j_k \leq p, \text{ 对于所有的 } m < n \quad (4)$$

式(4)等价于大尺度下水线弧是小尺度下水线弧的子集,即

$$WA_n^{\nabla}(I) \subseteq WA_m^{\nabla}(I), \text{ 对于所有的 } m < n \quad (5)$$

式(5)要求随着形态滤波器的尺度增大,水线弧不应发生漂移。

2 尺度间的水线漂移

直接使用式(2)作为多尺度形态滤波器会导致两种情况的水线漂移。第一种称之为超越漂移,即大尺度的结构元素超越了小尺度下的集水盆地,导致非原始梯度极大值处产生了新的水线。图1给出了一维情况下的一个例子。第二种漂移为平台漂移,在梯度的极大值平台上需要用所谓测地分水法计算水线,其原理是按平台两侧的基本集水盆地(不含梯度极大值区域的区域)的面积划分梯度极大值平台。如果平台两侧的基本集水盆地的面积被 Φ_n 滤波器改变,就可能导致平台上的水线漂移。图2给出了一维情况下的一个例子。

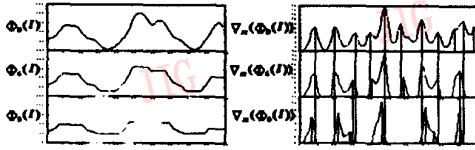


图1 超越漂移

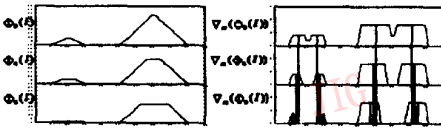


图2 平台漂移

图1和图2中左侧为在尺度0,4,6上重建的信号,右侧为相应的梯度,竖线标出了水线点的对应关系。

3 层化变换和梯度水线尺度空间

对于梯度水线而言,对集水盆地进行分割的唯一标准应当是方向梯度的极大值。可以注意到,上面的两种水线漂移完全是由形态滤波器造成的,并没有实际的物理边界与之对应。对于超越漂移,合理的处理方式应是结构元素尺寸超过集水盆地时,这个集水盆地应当被合并到与之相邻的所有区域中灰度最接近的一个。对于平台漂移,由于这时无法定义物理边界,因此只要整个平台经重建依然存在,最初的水线应当是我们始终使用的边界。据此可知,预处理应在最初(0尺度)水线划分的约束下进行,这是本文提出的层化变换的基本思想。

根据式(3),设灰度图象 \$I\$ 的水线划分为

$$WS_0(I) = \{CB_{i(0)}(g_{i(0)}) \mid 1 \leq i \leq p_0\}$$

对于一个图象点 \$I[x, y]\$,它的层化变换是 \$\Psi(I[x, y])\$ (见图3)

$$\Psi(I[x, y]) = g_{i(0)}, [x, y] \in CB_{i(0)}^\nabla(g_{i(0)}), 1 \leq i_0 \leq p_0 \quad (6)$$

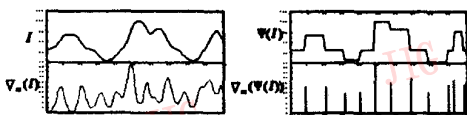
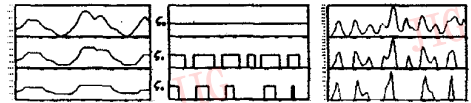


图3 层化变换

可以推得(参见图4),

$$\begin{aligned} \nabla_m(\Phi_n(I)) &= Z(\nabla_m(I), \text{cmp}(\Phi_n(I), I)) \\ &= Z(\nabla_m(I), \zeta_n) \end{aligned} \quad (7)$$



注:从左至右:原信号,重建掩码 \$\zeta\$ 和梯度。

图4 式(7)的说明

可以看到, \$\zeta_6 < \zeta_4 < \zeta_0\$。根据式(3')和式(7)可知

$$\begin{aligned} WS_n^\nabla(\Psi(I)) &= WS(\nabla_m(\Phi_n(\Psi(I)))) \\ &= WS(Z(\nabla_m(\Psi(I)), \zeta_n)) \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(6)形态梯度的定义可知(参见图5)

$$\begin{aligned} \nabla_m(\Psi(I[x, y])) &= T_\delta([x, y]) \\ &= \begin{cases} 0, & \text{if } [x, y] \in WA_0(I) \\ m_c(x, y), & \text{if } [x, y] \notin WA_0(I) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

这里 \$m_c(x, y)\$ 是一个正整数, \$T_\delta\$ 是 \$m_c\$ 的 \$\delta-0\$ 变换。



注:从左至右的尺度为0,4,6。大尺度下的水线只是对原始水线的标零重建,并且掩码函数随尺度增大而减小,因此水线将随尺度增大而越来越少,并且没有漂移。

图5 \$\Psi\$ 变换对梯度的影响

由式(8)和式(9)可知

$$WS_n^\nabla(\Psi(I)) = WS(Z(T_\delta(I), \zeta_n)) \quad (10)$$

因为 \$\zeta_n \le \zeta_m\$ 对于 \$n \ge m\$,有

$$Z(T_\delta(I), \zeta_n) \le Z(T_\delta(I), \zeta_m), \text{对于 } n \ge m.$$

在一个 \$\delta-0\$ 图象上计算水线时,水线弧尽由不为0的点构成,也就是

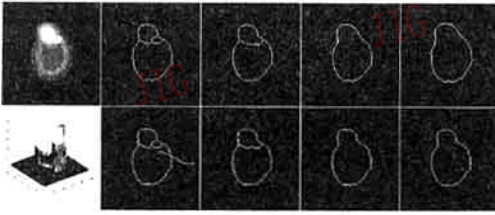
$$WA_n^\nabla(T_\delta(I)) = \{[x_k, y_k] \mid T_\delta(I[x_k, y_k]) \neq 0\},$$

由于 \$Z(T_\delta(I), \zeta_n)\$ 也是具有相同 \$m_c\$ 的 \$\delta-0\$ 图象,因此可推得

$$WA_n^\nabla(T_\delta(I)) \subseteq WA_m^\nabla(T_\delta(I)), \text{对于 } m \le n$$

即增加层化变换的预处理后式(10)的形式。由此,梯度水线的因果性得到保证,从而建立了所需的尺度空间。

图6给出了一个2维合成图象的例子。可以看到,区域合并也具有很好的物理意义。



注:上行:原始图象和尺度 0, 8, 12, 24 下的水线,注意超越漂移;下行:3 维层化图和 0, 8, 12, 24 尺度下的水线。

图 6 梯度水线和层化后的梯度水线
在 2 维合成图象上的对比

4 应用:区域跟踪的多尺度框架

作为一个灵活,鲁棒性高以及高效率的图象处理工具,水线变换被广泛地应用在灰度图象分割、编码等领域中。本节中讨论它在序列图象分析中的应用,并且提出一种基于上文的梯度水线尺度空间的多尺度处理框架来提高算法的稳定性和效率。

迄今为止,大多数运动分割和目标跟踪方法是依赖灰度信息的,而问题也是明显的,特定点的灰度信息和基于灰度的特征是不可靠的。有理由认为,形状和拓扑结构更为可靠,其在时域的变化也具有更高的可预测性。因此可以提出基于区域跟踪的方法,而梯度水线变换则成为合适的区域提取工具。本节的应用背景是 MPEG-4 压缩编码。MPEG-4 的基本思想是对前景和背景进行区分,然后分别压缩,对前景,全自动的标定方法存在很大的困难,而完全由人工进行标定也是不可接受的。因此,交互式标定加上自动目标跟踪成为比较实际的方法。对于交互式标定,本文给出一种基于不同尺度下梯度水线的集水盆地划分的逐步求精的方法。要跟踪的目标可以由大尺度下的集水盆地的组合表示,然后减小水线变换的尺度,将某些区域加入或消去,逐步细化跟踪对象。如果在这个过程中发生了水线漂移,处理起来是非常麻烦的,因此对原图象施加层化变换以保证水线不发生漂移。图 7 是这个标定过程的一个例子。

完成前景标定后,目标跟踪也可以按上述逐步求精的过程来进行。在这里,出于说明问题的考虑我们使用一种简单的策略。首先,目标可能的运动可以通过某些基于模型的方法如 Kalman 滤波器来估计,从而参考前景,进一步可以得到最大尺度下的参考集水盆地集。随着尺度的减小,我们力图找到与参考前景形状上最接近(根据某个相似性标准)的集水盆地的集合作为我们的跟踪结果,直到尺度足

够小为止。与前尺度下的参考集水盆地集的边界相邻的本尺度下的集水盆地则是构成这一步的参考集水盆地集时需要加入或减去的部分,从而得到更精确的解。这是一个符号化的背包问题,有了这个多尺度框架,由于每步考虑的集水盆地数目少了很多,其维数和复杂性都大大地下降了,搜索的效率和稳定性也得到了保证。图 8 示出了在图 7 的标定过程后跟踪过程的例子。



注:从左至右为:原图象,在尺度为 12,8,4 下进行的标定。

图 7 用多尺度水线变换进行交互式标定



从上至下:连续的视频帧,时间间隔为 400ms。从左至右:原始图象,形状估计,由估计得到的最大尺度(12)下的参考集,在小尺度(8,4)下的参考集和匹配结果。

图 8 区域跟踪的实验结果

5 结论

经过本文提出的层化变换后,可以得到多尺度测地重建下的梯度水线的严格的因果性,并且可以构造基于梯度水线的多尺度计算框架。在各种可能的应用中,本文讨论了基于梯度水线划分的多尺度目标跟踪方法。

参考文献

- 1 Vincent L, Soille P. Waters in Digital Space: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulation. PAMI, 1991, 13(6): 583 ~ 598.
- 2 Vincent L. Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms, IP, 1993, (2): 176 ~ 201.
- 3 Jackway P T. Gradient Watersheds in Morphological Scale-Space. IP, 1996, 5(6): 913 ~ 921.
- 4 Beucher S, Meyer F. The Morphological Approach to Segmentation: the Watershed Transformation. Mathematical Morphological in Image Processing, Doughery E R, ed. Optical Engineering.

New York, Basel, HongKong: Macel Dekker, 1993:433 ~ 482.

- 5 Najman L, Schmitt M. Watershed of a Continuous Function. Signal Processing, Special Issues on Mathematical Morphology,

1994,38(1).

- 6 Wang D. A Multiscale Gradient Algorithm for Image Segmentation Using Watershed. Pattern Recognition, 1997,30(12).



李毅 1996年进入中科院自动化所模式识别实验室,攻读博士学位。目前的研究兴趣是图象处理、基于模型的运动分析和目标识别。



廖明 1996年进入中科院自动化所模式识别实验室,攻读计算机视觉和计算机图形学方向的硕士学位。目前的研究兴趣是图象处理、运动分割和图象压缩。



马颂德 IEEE高级会员,1968年毕业于清华大学,1986年获法国国家博士学位,现为中科院自动化所所长,博士生导师,长期从事计算机视觉、模式识别和图象处理等方面的工作。



卢汉清 1982年毕业于哈尔滨工业大学,1988年在华中理工大学获博士学位,现为中科院自动化所副研究员。目前的研究兴趣为图象处理和应用,多媒体信息系统以及图象和视频数据库。

Scale Space of Gradient Watershed

Li Yi, Liao Ming, Ma Songde, Lu Hanqing

(National Laboratory of Pattern Recognition, Automation Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, we propose a stratification transformation on the intensity surface of grayscale image. This transformation is confined by the original watershed partition, and after this transformation, there exists a strict causality between gradient watershed under different scales of geodesic reconstruction. In this way, the scale space of gradient watershed can be established. Some possible applications of watershed transformation on image sequence analysis are discussed, and by the utilization of the multiscale framework of gradient watershed, the efficiency and stability can be greatly improved.

Keywords Gradient watershed, Geodesic reconstruction, Scale space, Area tracking