

基于 Hausdorff 距离的图像边缘检测方法

路 游, 郭江涛, 孟庆鑫

(中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘 要:边缘检测方法大多基于一阶微分或二阶微分,但微分有局部属性。用 Hausdorff 距离可以从整体上检测边缘。首先对图像进行重采样,将图像拆分成两个集合,然后利用 Hausdorff 距离构造的边缘强度映射给两个集合的每个点赋值以获得特征图。由于图像边缘特征的局部性,先由边缘强度映射作用于子图获得局部特征图,再由局部特征图获得原图的特征图。最后给出一种利用特征图确定图像边缘的计算方法。通过实验可以看出,该方法能够获得单像素宽度边缘,并对线性边缘有很好的检出效果。

关键词:图像处理;边缘检测;Hausdorff 距离;特征图

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)08-0071-08

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.08.015

A New Method of Edge Detection Based on Hausdorff Distance

LU You, GUO Jiang-tao, MENG Qing-xin

(College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum,
Beijing 102249, China)

Abstract: Most edge detection methods are based on first-order or second-order differential, but these are local methods. Using Hausdorff distance to detect the edge of an image is a holistic method. Firstly, resample the image, and split the image into two sets, then get the feature image by assigning a value for each point using the edge intensity mapping constructed by Hausdorff distance on the two sets. Since the edge features have local properties, in this paper, construct a map which can get local feature images using sub image and combine them into a feature image. Finally, a calculation method is given to get the edge image by feature image. It can be seen in experiment that this method can obtain the edge of a single pixel width, and have a good line-edge detection results.

Key words: image processing; edge detection; Hausdorff distance; feature image

0 引言

图像边缘检测是图像处理和计算机视觉中的基本问题。边缘检测的目的是标识数字图像中亮度变化明显的点。1965 年, Roberts 最早开始系统研究边缘检测方法,提出了用图像灰度的梯度来表征图像灰度变化的边缘检测算子,也称为 Roberts 算子^[1]。此后,有关边缘检测方面的算法不断出现,例如 Sobel 算子、Pre-witt 算子等。1986 年, Canny 提出了可以评价边缘检测方法性能指标的三个基本准则,即定位精度准则、信噪比准则和单边缘响应准则,并提出了 Canny 算子^[2]。1998 年, Tony 提出了边缘检测中自动尺度选择方法以及利用差分方法进行非极大值抑制^[3]。由于 Canny 算子易受噪声干扰^[4-5], 近年来,边缘检测的新方法不断

出现,如基于形态学的检测技术^[6]、利用灰色系统理论进行边缘检测^[7-8]等。

传统的边缘检测方法大致可分为两类:基于搜索和基于零交叉。基于搜索的边缘检测方法通常用一阶导数表示边缘强度,比如梯度幅值。基于零交叉的边缘检测方法通常用拉普拉斯算子或非线性微分方程的零交叉点来定位边缘。这两类都是局部化的处理方法。

文中采用整体化的方法,利用 Hausdorff 距离在整体上定位边缘。首先介绍了图像边缘检测发展历史和近年来出现的新方法,以及文中将采用的方法;其次定义了灰度图像的特征图,并阐述了利用 Hausdorff 距离进行边缘检测的思路;再次介绍了 Hausdorff 距离的定

收稿日期:2014-05-16

修回日期:2014-09-10

网络出版时间:2015-07-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60873093)

作者简介:路 游(1957-),男,博士,副教授,CCF 会员,研究方向为计算几何、图形学、虚拟现实;郭江涛(1988-),男,硕士生,研究方向为虚拟现实。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150721.1433.002.html>

义,并由此构造了图像空间的标量场映射,通过对图像的采样拆分构造特征图;最后阐述利用特征图提取边缘的算法,并进行了实验验证。

1 灰度图像的特征

将灰度图像看成三维空间中的点集,即:一幅 $M \times N$ 的灰度图上任意一个像素都可以写成 (x, y, z) 坐标的形式, z 值为坐标在 (x, y) 处像素的灰度值。

定义1:灰度图像空间 $\mathbb{I} := \{(x, y, z) \mid x, y \text{ 为像素坐标}, z \text{ 为}(x, y) \text{ 处的灰度值}\}$ 。

若用记号 T_d 表示集合的离散拓扑,用记号 T_u 表示集合的通常拓扑,则灰度图像空间 (\mathbb{I}, T_d) 是 (\mathbb{R}^3, T_u) 的诱导拓扑。

定义2:灰度图像的特征图是给灰度图像空间 \mathbb{I} 指定的 $[0, 1]$ 区间标量场。

灰度图像的梯度幅值图做归一化后可以看成是该灰度图像的特征图。这种特征比较局部,只考虑了每个像素点周围 2×2 或 3×3 的邻域。为了使得特征图更具整体性,考虑如下事实:对一幅灰度图像按照某种间隔采样,将会得到一幅分辨率低于原灰度图的图像,这幅图像看上去少了细节的东西。事实上,通过这种采样丢掉的是图像的某种特征。

如果将原图依某种采样拆分成两个像素集合,那么,可以利用两个集合的差异给灰度图像空间指定标量场,并且使标量场数值的大小反映像素点成为边缘的概率,这样可以获得该灰度图像具有边缘意义的特征图。

2 基于 Hausdorff 距离构造特征图

2.1 Hausdorff 距离

Hausdorff 距离是描述两组点集之间相似程度的一种量度,它是两个点集之间距离的一种定义形式。

假设有两组集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 则这两个集合之间的 Hausdorff 距离定义为^[9-10]:

$$H(A, B) := \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (1)$$

其中

$$h(A, B) := \max_{a_i \in A} \left\{ \min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \right\} \quad (2)$$

$$h(A, B) := \max_{b_j \in B} \left\{ \min_{a_i \in A} \|a_i - b_j\| \right\} \quad (3)$$

式中, $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$, $\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

式(1)称为双向 Hausdorff 距离,式(2)和式(3)分别称为从集合 A 到集合 B 和从集合 B 到集合 A 的单向 Hausdorff 距离^[11-17]。双向 Hausdorff 距离是两个单向距离中较大的,它度量了两个点集之间的最大不匹配程度^[18-20]。

2.2 构造标量场映射

为计算 Hausdorff 距离,可以构造如下矩阵 H :

$$H_{m \times n} = \begin{pmatrix} \|a_1 - b_1\| & \|a_1 - b_2\| & \cdots & \|a_1 - b_n\| \\ \|a_2 - b_1\| & \|a_2 - b_2\| & \cdots & \|a_2 - b_n\| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \|a_m - b_1\| & \|a_m - b_2\| & \cdots & \|a_m - b_n\| \end{pmatrix}$$

注意到式(2)中集合 $\{\min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\|\}$ 可以通过对矩阵 H 逐行取最小值获得;同样,式(3)中集合 $\{\min_{a_i \in A} \|a_i - b_j\|\}$ 可以通过对矩阵 H 逐列取最小值获得。若构造如下的一一映射关系:

$$f: \begin{cases} a_i & \min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \\ b_j & \min_{a_i \in A} \|a_i - b_j\| \end{cases} \quad (4)$$

则 Hausdorff 距离又可写成 $\min_{x \in A \cup B} f(x)$ 。映射 f 使得集合 A 和 B 的每个元素都获得了一个映射值,即, $f: A \cup B \rightarrow \mathbb{R}^+$ 给 $A \cup B$ 指定了标量场。

2.3 灰度图像的拆分与特征图的构造

若用式(4)的映射 f ,需要对原灰度图像空间 \mathbb{I} 进行拆分,使其成为两个不相交的点集。拆分的方法有多种。直接选取均匀采样的方法,即横向和纵向各间隔 l 个点取一个样点,记采样点集为 B ,记非采样点集为 $A = \mathbb{I} - B$,代入式(4)即可得到空间 \mathbb{I} 具有 Hausdorff 距离意义的标量场($\|\cdot\|$ 取 Euclid 距离)。实际上,为减小灰度图靠近边框的像素受到的影响,可对灰度图做足够的偶延拓之后再拆分。

注意到采样点集 B 是 \mathbb{I} 的间隔为 l 的采样, B 的选取有 $(l+1)^2$ 种不同方式,记为 B^i , $i \in \{1, 2, \dots, (l+1)^2\}$ 。每种方式都会得到不同的标量场,记标量场的数值矩阵为 $F_{M \times N}^i$,对应的映射为 $f^{B^i}: \mathbb{I} \rightarrow F_{M \times N}^i$ 。用记号 $f_{\mathbb{I}}$ 表示原灰度图像 \mathbb{I} 上的标量场映射,令 $f_{\mathbb{I}} = \sum_{i=1}^{(l+1)^2} f^{B^i}$, 则:

$$f_{\mathbb{I}}: \mathbb{I} \rightarrow \sum_{i=1}^{(l+1)^2} F_{M \times N}^i \quad (5)$$

将式(5)写作 $f_{\mathbb{I}}: \mathbb{I} \rightarrow F$, 则把 $F/\max F$ 记为特征图。由于 Hausdorff 距离度量了两个点集之间的最大不匹配程度,因此特征图中的值越大,表示该点成为边缘的强度越高。

2.4 图像边缘的局部性与特征图的整体性

考虑从原灰度图像 \mathbb{I} 中裁剪一幅子图 I , $I \subset \mathbb{I}$, 若用 \mathbb{E} 表示 \mathbb{I} 的边缘点集,用 E 表示 I 的边缘点集,则有 $E = I \cap \mathbb{E}$ 。可见图像的边缘是相对局部的概念。梯度幅值图考虑了每个像素点周围 2×2 或 3×3 的邻域,而具有 Hausdorff 距离意义的特征图把全图看作每个

像素点的邻域。对图像边缘而言,某一点是否成为边缘点的特征值是由该点的邻域确定的。 2×2 或 3×3 的邻域“过于局部”,可以考虑扩大邻域范围。

取原图像上 $L \times L$ 子图 I , $I \subset \mathbb{I}$, $L = k(l+1) + 1$, $k = 1, 2, \dots$ 。对任意选定的 $L \times L$ 子图,必存在唯一一个采样图,使得该采样图有 $(k+1)^2$ 个点。对子图 I 的这种唯一拆分,可构造如下映射:

$$f_I: \begin{cases} I & \rightarrow F_{L \times L}(I) \\ \mathbb{I} - I & \rightarrow \{0\} \end{cases}$$

其中, $F_{L \times L}(I)$ 表示 I 的唯一拆分在式(4) f 的映射下获得的标量场的数值矩阵。用记号 $f_{\mathbb{I}}$ 来表示原灰度图像 \mathbb{I} 上的标量场映射,则有 $f_{\mathbb{I}} = \sum_{\forall I} f_I$ 。当 $L \times L$ 子图取遍所有情况时,原灰度图的每个像素都获得了 L^2 个映射值。这时,每一点是否成为边缘点的特征值由该点为中心的 $(2L-1) \times (2L-1)$ 邻域内的点确定。由于需要处理子图, $f_{\mathbb{I}}$ 的构造将变得十分困难。为此,需要换一种方式来构造。用记号 $\mathbb{I}_{i,j}$ 表示原灰度图像 \mathbb{I} 中像素位置 (i,j) 的点,则有如下推论:

推论 1: $\forall \mathbb{I}_{i,j}, \exists I^\alpha: \text{s.t. } \mathbb{I}_{i,j} \in I^\alpha, \alpha \in \{1, 2, \dots, L^2\} \wedge \forall \alpha_1, \alpha_2: \alpha_1 \neq \alpha_2 \Leftrightarrow I^{\alpha_1} \neq I^{\alpha_2}$ 。

推论 2: $\forall I^\alpha, \exists ! I_B^\alpha: \text{s.t. } |I_B^\alpha| = (k+1)^2$ 。

记 $I_A^\alpha = I^\alpha - I_B^\alpha$, 则必有 $\mathbb{I}_{i,j} \in I_A^\alpha$ 或 $\mathbb{I}_{i,j} \in I_B^\alpha$ 成立。令

$$\mathbb{I}_{i,j} \in I_B^\lambda, \lambda \in \{1, 2, \dots, (k+1)^2\}$$

$$\mathbb{I}_{i,j} \in I_A^\mu, \mu \in \{(k+1)^2 + 1, (k+1)^2 + 2, \dots, L^2\}$$

则可以构造如下映射 $f_{\mathbb{I}}$:

$$f_{\mathbb{I}}: \mathbb{I}_{i,j} \rightarrow \sum_{\lambda} \min_{\forall a \in I_A^\lambda} \|a - \mathbb{I}_{i,j}\| + \sum_{\mu} \min_{\forall b \in I_B^\mu} \|b - \mathbb{I}_{i,j}\| \quad (6)$$

将式(6)写作 $f_{\mathbb{I}}: \mathbb{I} \rightarrow F$, 则 $F/\max F$ 即为特征图。

3 根据特征图获取图像边缘

记 $\mathbb{F} \equiv F/\max F$, \mathbb{F} 中的值越大,表示该点成为边缘的强度越高。因此下文的边缘提取一定程度上是对 \mathbb{F} 的脊线的提取。

适当选取全局低阈值 F_l , 将特征值小于全局低阈值的点标记为 0, 并记

$$F^a \equiv (\mathbb{F} \geq F_l) \quad (7)$$

考虑特征图任意一点的 3×3 邻域矩阵,若中心点的值既不大于这 9 个值的中值,也不大于这 9 个值的均值,则判断该点不构成边缘点。 $F_{i,j}$ 的 3×3 邻域为 $U_{3 \times 3}(F_{i,j})$,

$$U_{3 \times 3}(F_{i,j}) \equiv \begin{pmatrix} F_{i-1,j-1} & F_{i-1,j} & F_{i-1,j+1} \\ F_{i,j-1} & F_{i,j} & F_{i,j+1} \\ F_{i+1,j-1} & F_{i+1,j} & F_{i+1,j+1} \end{pmatrix}$$

记矩阵 $M_{m \times n}$ 的所有元素均值的表达式为 $\overline{M_{m \times n}}$, 所有元素中值的表达式为 $Q_{1/2}(M_{m \times n})$, 并记

$$F_{i,j}^b \equiv \begin{cases} 1, & F_{i,j} > \overline{U_{3 \times 3}(F_{i,j})} \vee F_{i,j} > Q_{1/2}(U_{3 \times 3}(F_{i,j})) \\ 0, & F_{i,j} \leq \overline{U_{3 \times 3}(F_{i,j})} \wedge F_{i,j} \leq Q_{1/2}(U_{3 \times 3}(F_{i,j})) \end{cases} \quad (8)$$

记矩阵 $M_{m \times n}$ 的所有元素之和的函数为 Σ ,

$$\Sigma: M_{m \times n} \rightarrow (1 \ 1 \ \dots \ 1)_m M_{m \times n} (1 \ 1 \ \dots \ 1)_n^T$$

用符号 $*$ 表示矩阵的 Hadamard 乘积,并构造如下四个方向模版:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad M_2 = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad M_4 = \begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}$$

则 $\forall i,j$, 记

$$P \equiv \{p \mid \Sigma(U_{3 \times 3}(F_{i,j}) M_p) < 0\} \quad (9)$$

$P \subset \{1, 2, 3, 4\}$, 记

$$F_{i,j}^c \equiv \begin{cases} 1, & \forall p \in P \left(F_{i,j} \geq F_{i+p-4\lfloor p/4\rfloor-2,j+\lfloor p/4\rfloor-1} \wedge F_{i,j} \geq F_{i-p+4\lfloor p/4\rfloor+2,j-\lfloor p/4\rfloor+1} \right) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

由于特征图中值越大,表示该点更有可能成为边缘,所以考虑 4 个 Hadamard 乘积的矩阵和为负的,如式(9),找出哪个方向不可能成为边缘方向。假设第一个模版计算得的值为负,那么如果中心点的特征值小于模版两个正值方向点(左上、右下)任意一个的值,则中心点不构成边缘点。

式(7)、(8)、(10)均判定为边缘点的点,才可能成为边缘点,不可能成为边缘点的点的标量场值记为 0,于是记

$$F \equiv F^a \wedge F^b \wedge F^c$$

$F_{i,j} = 1$ 表示 $F_{i,j}$ 可能成为边缘点。

选取全局高阈值 F_h , 使得高于该阈值的点均为边缘点,把这个图称为基础图 F^b , 记

$$F^b \equiv (F * \mathbb{F} > F_h)$$

至此,图 $F - F^b$ 不为 0 的点已被分割成多个具有 8 连通的区域。设 8 连通的区域有 X 个,用与 \mathbb{F} 同维的矩阵列 $\partial_\eta, \eta = 1, 2, \dots, X$ 表示,则有

$$F - F^b = \sum_{\eta=1}^X \partial_\eta, \forall \eta_1, \eta_2: \eta_1 \neq \eta_2 \Leftrightarrow \partial_{\eta_1} \wedge \partial_{\eta_2} = \{0\}$$

先设定一个阈值 S , 再取出任意一个连通区域,若该连通区域中所有点的特征值之和低于阈值,则舍掉该连通区域。所有舍掉的区域为

$$\begin{aligned} & \sum_{\Sigma(\partial_{\eta} * \mathbb{F}) < S} V \partial_{\eta} \\ & \text{令} \\ & \mathbf{e} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

对任意未舍掉的连通区域 ∂_{η} , 用 \mathbf{e} 对 ∂_{η} 进行形态学闭运算 $\partial_{\eta} \bullet \mathbf{e}$, 则必有

$$\Sigma(\partial_{\eta} \bullet \mathbf{e}) \geq \Sigma(\partial_{\eta})$$

对点数增加比例限定阈值 Δ , 并记 ∂_{η} 的点数增加比例 Δ_{η} 为

$$\Delta_{\eta} = \frac{\Sigma(\partial_{\eta} \bullet \mathbf{e} - \partial_{\eta})}{\Sigma(\partial_{\eta})}$$

低于阈值 Δ 的连通区域扩充进基础图, 对高于阈值 Δ 的连通区域设定一个阈值 F_m , 将区域中的点值大于阈值的扩充进基础图, 其余点舍掉。至此, 可以得到边缘图 \mathbb{E} :

$$\mathbb{E} = F^B + \sum_{\Sigma(\partial_{\eta} * \mathbb{F}) \geq S} V \partial_{\eta} - (\mathbb{F} * \sum_{\Delta_{\eta} \geq \Delta} V \partial_{\eta} \leq F_m) \quad (11)$$

4 实验结果

实验选取采样间隔 $l = 6$, 令 $L = 2(l + 1) + 1$, 获取图像边缘过程的阈值取值如表 1 所示。

表 1 阈值取值

| 阈值 | F_l | F_h | S | Δ | F_m |
|----|-------------|--------|-------------|----------|------------|
| 取值 | $\bar{F}/3$ | $1/10$ | $10\bar{F}$ | 0.3 | $5\bar{F}$ |

选取单像素宽度的“田”字图, 如图 1(a) 所示。

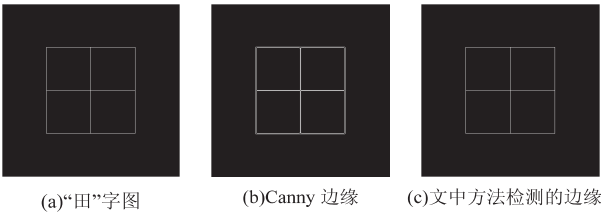


图 1 “田”字图及其边缘

由于 Canny 算法使用了平滑函数, 使得线性边缘的高亮度区域与低亮度的背景之间的陡峭分界线变得平缓, 因而边缘分布在高亮度区域的两侧。图 2 清晰地显示了这一点。文中采用的方法可以保留线性边缘的边缘特征。图 1 显示了文中方法获得的边缘与 Canny 算法获得的边缘的不同。

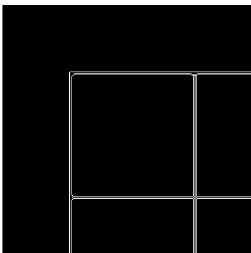


图 2 “田”字图的 Canny 边缘(局部放大)

以 Lena 为例, 如图 3(a), 由式(6)的映射可以得到如图 3(b)所示的特征图, 由式(11)可得如图 3(c)所示的边缘图。

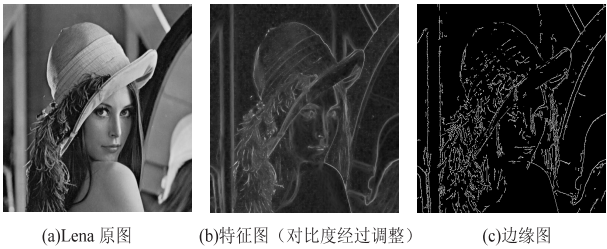


图 3 Lena 原图、特征图和边缘图

从边缘图可以看出, Lena 原图的边缘信息已被检出, 而且与 Canny 算法不同的是边缘具有 8 连通性。实验中也发现, 采样间隔 l 对边缘的判定影响不大。

5 结束语

文中利用 Hausdorff 距离是度量两个点集之间最大不匹配程度的特点, 构造了具有 Hausdorff 距离特性的映射, 并作用于原图的均匀采样拆分, 得到特征图。由于特征图不含边缘方向信息, 边缘提取过程加入了弱的非边缘方向抑制。从边缘检测的效果来看, 该方法具有可行性, 可检出具有 8 连通性的单像素宽度边缘, 并对线性边缘检出效果较好。

参考文献:

[1] Roberts L G. Machine perception of three-dimensional solids [C]//Proc of optical and electro-optimal information processing. Cambridge, Mass: MIT Press, 1965:157-197.

[2] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):679-698.

[3] Lindeberg T. Edge detection and ridge detection with automatic scale selection[J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(2):117-154.

[4] Wang Bing, Fan Shaosheng. An improved CANNY edge detection algorithm[C]//Proc of computer science and engineering. [s. l.]:[s. n.], 2009:497-500.

[5] Pan Dafu, Wang Bo. An improved Canny algorithm[C]//Proceedings of the 27th Chinese control conference. [s. l.]:[s. n.], 2008:456-459.

[6] Heath M, Sarkara S, Sanockib T, et al. Comparison of edge detectors; a methodology and initial study[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69(1):38-54.

[7] Li Junfeng, Dai Wenzhan. Research of image edge detection and application based on grey prediction model[C]//Proc of wavelet analysis and pattern recognition. [s. l.]:[s. n.], 2007:286-291.

[8] Wan Yan, Jia Shanshan, Wang Dong. Edge detection algorithm

较 GAFSA 均有提升。

5 结束语

文中针对 GAFSA 后期无效计算多、无法设定收敛精度的问题,利用改进单纯形法进行了改进设计。当 GAFSA 迭代至后期时,如满足式(2),则切换至改进单纯形法继续寻优,得到了 MS_GAFSA,并通过标准测试函数对 GAFSA 和 MS_GAFSA 进行了仿真计算。从实验结果的对比可以看出,MS_GAFSA 能够有效避免原算法后期的随机无效计算,提高了收敛速度,同时寻优精度也有所提高,表明了 MS_GAFSA 的有效性和可行性。理论上讲,可以将任何一种经典优化方法(例如,最速下降法、共轭梯度法、Powell 法等)与 GAFSA 相结合,以加快收敛速度,提高寻优精度。但考虑到算法的复杂度,还是采用不需要计算函数导数值的方法为好。另外,式(2)中的数字 10 是通过对 34 个标准测试函数的寻优计算而得到的经验值。实践结果表明,取在 8~10 寻优效果较好。

参考文献:

[1] 李晓磊.一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法[D].杭州:浙江大学,2003.

[2] 江铭炎,袁东风.人工鱼群算法及其应用[M].北京:科学出版社,2012.

[3] Jiang M Y, Cheng Y M, Yuan D F. Improved artificial fish swarm algorithm[C]//Proc of 5th international conference on natural computation. [s. l.]:[s. n.],2009:281-285.

[4] 黄华娟,周永权.改进型人工鱼群算法及复杂函数全局优

化方法[J].广西师范大学学报:自然科学版,2008,26(1):194-197.

[5] 曲良东,何登旭.一种混沌人工鱼群优化算法[J].计算机工程与应用,2010,46(22):40-42.

[6] Zhu K C, Jiang M Y. Quantum artificial fish swarm algorithm [C]//Proceedings of the 8th world congress on intelligent control and automation. [s. l.]:[s. n.],2010:1-5.

[7] 刘佳,刘丽娜,李靖,等.基于模拟退火算法的改进人工鱼群算法研究[J].计算机仿真,2011,28(10):195-198.

[8] Jiang M Y, Cheng Y M. Simulated annealing artificial fish swarm algorithm [C]//Proc of 8th world congress on intelligent control and automation. [s. l.]:[s. n.],2010:1590-1593.

[9] 古明家,宣士斌,廉侃超,等.基于蚁群和人工鱼群算法融合的 QoS 路由算法[J].计算机技术与发展,2009,19(7):145-148.

[10] 张昀,于舒娟,王静.基于鱼群算法的无线传感网簇内信号盲检测[J].计算机技术与发展,2014,24(12):16-19.

[11] 黄光球,苏锦旗.基于人工鱼群算法的高级综合生产计划优化研究[J].微机发展(现更名:计算机技术与发展),2015,15(10):49-51.

[12] 蒋珉,柴干,王宏华,等.控制系统计算机仿真[M].第2版.北京:电子工业出版社,2012.

[13] 陈国初,俞金寿.单纯形微粒群优化算法及其应用[J].系统仿真学报,2006,18(4):862-865.

[14] Rahnamayan S, Tizhoosh H R, Salama M M A. Opposition-based differential evolution[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2008,12(1):64-79.

(上接第 74 页)

based on grey system theory combined with directed graph [C]//Proc of ICIG. Qingdao:IEEE,2013:180-185.

[9] 牛力丕,毛士艺,陈炜.基于 Hausdorff 距离的图像配准研究[J].电子与信息学报,2007,29(1):35-38.

[10] Zhang Jianxun, Liu Yu. Medical image registration based on wavelet transform using Hausdorff distance[J]. Transactions on Edutainment,2012,7145:248-254.

[11] 王靖,朱梦宇,赵保军,等.基于小波和改进型 Hausdorff 距离的遥感图像配准方法[J].电子学报,2006,34(12):2167-2169.

[12] 汪亚明.图像匹配的鲁棒型 Hausdorff 方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(3):238-241.

[13] 周志强,汪渤.一种基于鲁棒 Hausdorff 距离的目标匹配算法[J].计算机应用,2009,29(1):86-88.

[14] 蒋新土,吕岳.基于改进的加权 Hausdorff 距离的图像匹

[15] 高晶,孙继银,刘婧.基于邻域灰度信息的 Hausdorff 距离图像匹配方法[J].计算机应用,2011,31(3):741-744.

[16] 杨兵,刘永才,田金文,等.基于新的加权 Hausdorff 距离的图像匹配[J].红外与激光工程,2007,36(5):751-753.

[17] Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object matching algorithms using robust Hausdorff distance measures[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1999,8(3):425-429.

[18] 徐遵义,晏磊,宁书年,等.基于 Hausdorff 距离的海底地形匹配算法仿真研究[J].计算机工程,2007,33(9):7-9.

[19] 张良国,吴江琴,高文,等.基于 Hausdorff 距离的手势识别[J].中国图象图形学报: A 辑,2002,7(11):1144-1150.

[20] 陈飒,吴一全.基于 Contourlet 域 Hausdorff 距离和粒子群的多源遥感图像匹配[J].测绘学报,2010,39(6):599-604.

基于Hausdorff距离的图像边缘检测方法

作者：[路游](#)，[郭江涛](#)，[孟庆鑫](#)，[LU You](#)，[GUO Jiang-tao](#)，[MENG Qing-xin](#)

作者单位：[中国石油大学 北京 地球物理与信息工程学院, 北京, 102249](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015(8)

引用本文格式：[路游](#).[郭江涛](#).[孟庆鑫](#).[LU You](#).[GUO Jiang-tao](#).[MENG Qing-xin](#) [基于Hausdorff距离的图像边缘检测方法](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(8)