一种提取物体线形骨架的新方法

刘俊涛[1] 刘文予[2] 吴彩华[3] 原 亮[1]

摘 要 提出了一种提取物体线形骨架的新方法. 该方法首先计算物体距离变换的梯度, 从而得到一个矢量场. 距离变换的梯度对提取物体线形骨架具有重要意义, 可据此获得物体内部的关键点, 其中每一个关键点代表了物体的一个凸部分. 之后, 用搜索梯度最短路径的方法连接关键点, 得到物体的线形骨架. 本文方法得到的线形骨架能很好地反映物体拓扑和形状特征, 并不易受边界噪声干扰. 此外, 本文方法克服了基于距离变换的骨架提取算法的固有缺点, 获得了具有良好连通性的骨架. 因此, 基于本文方法得到的骨架能用于物体识别和匹配等领域. 对大量二维、三维物体的实验取得了令人满意的效果.

关键词 线形骨架, 距离变换, 梯度
中图分类号 TP391.4

A New Method of Extracting Objects′ Curve-skeleton

LIU Jun-Tao[1] LIU Wen-Yu[2] WU Cai-Hua[3] YUAN Liang[1]

Abstract A new method of extracting the curve-skeleton of the objects is proposed. The gradient of the distance transform, which obtains a vector field and is valuable for extracting curve-skeleton, is used to detect critical points inside the objects. Each critical point represents a convex segment of the object. Then, the critical points are connected through searching the shortest gradient path, and thus, the curve-skeleton of the object is obtained. The method proposed in this paper is insensitive to the boundary noise, and the topological and geometrical features of the object can be represented by the extracted curve-skeleton. Furthermore, compared with other methods based on distance transform, the proposed method guarantees the connectivity of the curve-skeleton. The extracted curve-skeleton can be applied to objects recognition, matching and so on. The results of experiments on a large number of 2D and 3D objects are satisfying.

Key words Curve-skeleton, distance transform, gradient

骨架 (Skeleton) 又称中轴 (Medial axis), 通常使用烧草模型[1] 和最大球 (圆)[2] 模型来描述. 骨架有着与原物体相同的拓扑和形状信息, 是一种性能优良的几何特征, 能够有效地描述物体, 因此, 在物体识别、路径规划、医学工程[3] 等领域均有应用. 一般而言, 由二值图像表示的二维物体的骨架均由曲线连接而成, 而由体素模型表示的三维物体的骨架则往往由一些曲面组成. 由于曲面的表示比较复杂, 描述其特征比较困难, 因此, 需设法直接得到三维物体的线形骨架 (Curve skeleton), 以便后续处理.

骨架提取算法大致可以分为两类. 一类是基于细化 (Thinning) 的方法[4−5], 即在保持拓扑不变性的条件约束下, 依据体素 (像素) 邻域信息设定准则, 采用迭代的方法逐步剔除普通点, 直到仅剩骨架点. 细化算法生成的骨架难以保证准确性和光滑性[6], 需要进一步调整. 另一类是基于距离变换的算法[7−11]. 这类方法先对物体进行距离变换, 据此来寻找骨架点. 一般地, 基于距离变换的骨架提取算法获得的骨架点位置比较准确, 但难以保证整个骨架的连通性. 文献 [7] 中提出了一种基于距离变换的方法, 该方法除需要对物体进行距离变换外, 还需要得到距每个体素点距离最近的边界点的坐标, 据此建立标准确定骨架点. 该方法能得到线形骨架, 但当物体分支比较细小时难以保证骨架的连通性. 文献 [8] 提出了一种新的基于距离变换的骨架提取方法. 该方法取距离变换值最大且靠近物体重心的点作为骨架生长的起始点, 然后按照覆盖、判断新分支数和生长新骨架点几个步骤进行迭代. 该方法得到的二维物体线形骨架具有很好的连通性, 但不能得到三维物体的线形骨架. 广义势场方法[9−10] 假定物体的边缘上聚集了均匀分布的同种电荷, 这些电荷在物体内部产生了一个稳定的电场. 该方法首先选择物体边界上的凸点作为起始点, 然后依照电场的方向移动起始点到场强为 0 的地方. 起始点的移动轨迹构成骨架的一个分支, 最后连接所有分支得到骨架. 广义势场方法利用了不同于距离变换的矢量场, 取得了很好的结果. 文献 [11] 对广义势场方法进行了改

收稿日期 2007-01-09 收修改稿日期 2007-11-05
Received January 9, 2007; in revised form November 5, 2007
国家自然科学基金 (60273099, 60471022) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60273099, 60471022)
1. 军械工程学院计算机工程系 石家庄 050003 2. 华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074 3. 军械工程学院装备指挥与管理系 石家庄 050003
1. Department of Computer Engineering, Mechanical Engineering Institute, Shijiazhuang 050003 2. Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074 3. Department of Equipment Command & Management Engineering, Mechanical Engineering Institute, Shijiazhuang 050003
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.00617

进, 该方法将场强为 0 的点作为关键点, 按照文献 [9] 中的力跟踪方法连接各个关键点, 得到物体的核骨架, 然后选择曲率较大的边界点继续生长骨架得到物体的层次骨架. 该方法得到的线形骨架具有很好的连通性, 对边界噪声不敏感. 但是, 由于需要计算广义势场, 计算复杂度较高.

实际上, 距离变换可看做一个标量场, 而与其相关联的具有重要信息的矢量场是距离变换的梯度. 本文依据距离场及其梯度得到物体内部的一些关键点, 用保证拓扑不变的方法连接这些关键点得到了物体的线形骨架. 不同于传统的基于距离变换的骨架提取算法, 本文的方法能很好地保证骨架的连通性. 此外, 计算梯度时无需像处理广义势场那样计算积分. 因此, 本文方法的计算复杂度低, 同时, 亦能处理一定的边界噪声.

1 线形骨架提取

本文方法首先是对物体进行距离变换并得到距离场的梯度. 由于距离场的梯度是一个矢量场, 且对提取物体线形骨架具有重要意义, 因此我们以此为标准, 获得物体中的关键点. 然后用保证拓扑不变的方法连接这些关键点, 得到物体的线形骨架. 为了便于讨论, 下面提到的物体均指离散化后的物体, 即在三维空间中指的是用体素表示的物体模型 (由多边形网格表示的三维物体需用体素化的方法得到体素模型), 在二维空间中则对应一个二值图像. 下面详细介绍该方法.

1.1 距离变换及其梯度

距离变换即计算物体内部的体素 (像素) 到物体边界的最小距离. 根据距离的不同定义可以将距离变换分为欧氏和非欧氏两种. 非欧氏距离变换用棋盘距离替代欧氏距离, 以减少计算量. 非欧氏距离变换是欧氏距离变换的一种近似, 因此不能准确地得到物体的骨架点的位置. 本文采用文献 [12−13] 中提出的方法快速计算物体的欧氏距离变换.

通过距离变换我们得到了一个标量场 — 距离场. 物体的距离场和骨架之间有着某种联系. 按照骨架的最大圆 (球) 定义[2], 骨架点处的距离变换值应该比其大多数相邻点的距离变换值要大. 如果把距离场看作高低起伏的地形, 那么提取物体的骨架事实上是寻找距离场中的脊线. 图 1 (b) 表示了图 1 (a) 中物体的距离变换, 深色处表示数值较小的位置. 可以看到, 如果将距离场中的脊线提取出来则获得了物体的精确骨架.

(a) 原物体 (b) 距离变换 (c) 距离变换梯度的模

(a) Original object (b) Distance transform (c) $|\nabla DT|$

图 1 原物体, 距离变换和距离变换梯度的模

Fig. 1 Original object, distance transform, and $|\nabla DT|$

要获得距离场的脊线需要考察距离场的局部特征, 此时, 可以利用距离场的梯度. 以三维空间为例, 设物体的距离场为 $DT(x, y, z)$, $DT(x_0, y_0, z_0)$ 表示体素点 $p(x_0, y_0, z_0)$ 处距离变换的值. 距离场的梯度可以表示为

$$\nabla DT = (\frac{\partial DT}{\partial x}, \frac{\partial DT}{\partial y}, \frac{\partial DT}{\partial z}) \tag{1}$$

进一步, 计算梯度方向上的方向导数. 此时, 方向导数取得最大值, 即梯度向量的模, 如式 (2) 所示.

$$|\nabla DT| = \sqrt{(\frac{\partial DT}{\partial x})^2 + (\frac{\partial DT}{\partial y})^2 + (\frac{\partial DT}{\partial z})^2} \tag{2}$$

梯度方向上的方向导数实际上表示的是距离场在梯度方向上的变化速率. 如前所述, 骨架点实际是距离场的脊线, 而距离场的脊线正是距离场的梯度发生突变的地方. 因此 $|\nabla DT|$ 是相当重要的信息. 图 1 (c) 是图 1 (b) 中距离场梯度的模, 深色处表示 $|\nabla DT|$ 数值较小的位置. 对比这两个图可以发现, $|\nabla DT|$ 数值较小的位置正是距离场脊线的位置. 然而, 不能简单地取 $|\nabla DT|$ 数值较小的体素 (像素) 作为骨架点, 因为这样难以保证骨架的连通性, 更重要的是, 这样很难得到线形骨架, 尤其是在三维空间中更是如此. 为此, 我们依据物体的距离变换及其梯度的模寻找关键点, 以获得连通的线形骨架.

1.2 关键点

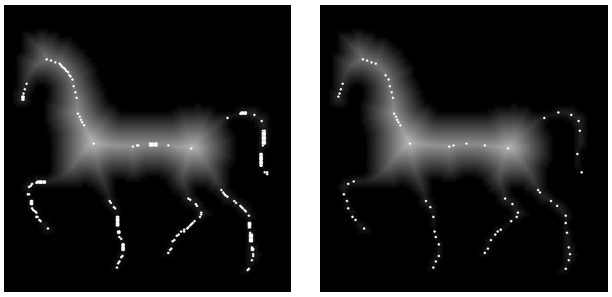
一个关键点是物体的内部的一个体素 (像素), 关键点代表了物体的一个凸部分.

定义 1. p 是物体的体素 (或像素), $DT(p)$ 是 p 处的距离变换, Q 是 p 的所有邻接点组成的集合, 若满足 $\forall q \in Q$, $DT(p) \geq DT(q)$, 则称 p 为距离变换的局部极大点.

邻接点的定义可参看文献 [5], 其中将体素 (像素) 的邻接关系进行了细分 (三维空间中分为 6-邻接、18-邻接和 26-邻接, 二维空间中分为 4-邻接和 8-邻接), 本文则不加区分地称其为邻接关系.

由于骨架点处的距离变换值应该比其大多数邻

接点的距离变换值大, 因此距离变换的局部极大点是潜在的骨架点. 图 2 (a) 显示了图 1 (b) 中距离变换的局部极大点 (用白色的圆点标出), 可以看到局部极大点都落在了距离变换的脊线上.



(a) 距离变换的局部极大点　　(b) 关键点

(a) Local maximum of DT　　(b) Critical points

图 2　距离变换的局部极大点与关键点

Fig. 2　Local maximum of DT and critical points

定义 2. 关键点是连通的距离变换的局部极大点中 $|\nabla DT|$ 值最小的点.

根据距离变换的局部极大点的定义和连通关系的传递性, 可以证明连通的局部极大点具有相同的距离变换值. 更为重要的是, 一组连通的局部极大点对应了物体的一个凸部分, 而较小的 $|\nabla DT|$ 值又指示了骨架点的存在, 因此我们选择连通的距离变换局部极大点中具有最小 $|\nabla DT|$ 值的点, 即关键点, 来代表这一凸部分的特征.

根据上述定义, 很容易获得物体的关键点. 如图 2 (b) 所示, 白色的圆点标明了关键点的位置, 图 3 显示了关键点和 $|\nabla DT|$ 值的对比. 不难发现, 所有关键点均落在了 $|\nabla DT|$ 值较小的位置. 因此, 可以认为关键点是物体线形骨架的一个子集, 只需要按照某种适当的方法将关键点连接起来, 即可得到物体的线形骨架.

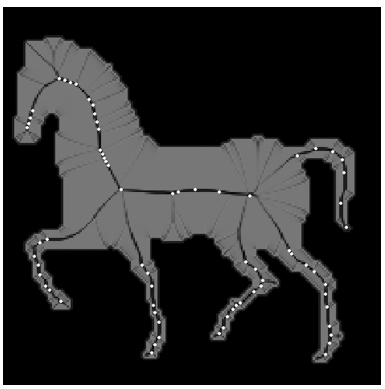


图 3　关键点和 $|\nabla DT|$ 对比

Fig. 3　Comparison between critical points and $|\nabla DT|$

1.3　梯度最短路径

定义 3. 设 p 和 q 是物体中的邻接点, 则 p 与 q 之间的梯度距离记为 $|(p,q)|_G$, $|(p,q)|_G = |\nabla DT(p)| + |\nabla DT(q)|$.

定义 4. 设 $R = \{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$ 是物体中一段连通的路径, 其中 $p_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 是 R 上的体素 (像素), 称 R 包含的体素 (像素) 个数为 R 的体素 (像素) 长度, 记为 $|R|_v$; R 的梯度长度记为 $|R|_G$, $|R|_G = \sum_{i=1}^{n} |\nabla DT(p_i)|$.

定义 5. 设 p 和 q 是物体中的体素 (像素), 称 p 和 q 之间所有连通的路径中梯度长度最短的路径为 p 和 q 之间的梯度最短路径, 记为 $R_G(p,q)$.

从图 1 (c) 可以看到距离变换脊线处的 $|\nabla DT|$ 值比其他位置的小得多, 而关键点又位于距离变换的脊线上. 如果连接两个关键点的路径不与距离场的脊线重合, 则会有较大的梯度距离. 所以, 两个关键点之间的梯度最短路径一定是骨架的一个分支, 连接所有这些分支可以获得物体的线形骨架.

1.4　算法描述

为了获得物体的线形骨架, 我们从距离变换最大的关键点开始, 用梯度最短路径连接各个关键点. 每一段梯度最短路径作为骨架的一个分支, 详述如下.

算法 1. 提取物体线形骨架

输入: 物体 O.

输出: 物体 O 的线形骨架 S.

步骤:

1) 计算物体 O 的距离变换 DT;

2) 计算 DT 的梯度, 并用式 (2) 计算 $|\nabla DT|$;

3) 获得关键点集 $C = \{c_1, c_2, \cdots\}$; 取距离变换最大的关键点作为起始点 s, 将其余的关键点加入终点集 E;

4) 搜索从起始点 s 到 E 中所有点的梯度最短路径 $R_G(s, e_i), e_i \in E$, 将它们加入候选骨架枝集合 B 中;

5) 选择 B 中体素 (像素) 长度最大的一条路径 R_m, 删除路径 R_m 上已在骨架 S 中的体素 (像素), 将剩下的部分作为骨架的一个分支加入 S 中, 并把 R_m 从集合 B 中删除;

6) 重复执行 5), 直到集合 B 为空.

上面的算法首先计算物体的距离变换及其梯度, 并根据定义 2 寻找关键点. 然后以距离变换最大的关键点为起始点, 搜索起始点到其他关键点的梯度最短路径. 最终按照这些梯度最短路径像素 (体素) 长度递减的顺序, 把它们加入到物体的骨架中. 图 4 仍以图 1 (a) 中的物体为例, 显示了算法执行的结果. 其中, 白色的曲线就是物体的线形骨架. 从图 4

中可以看到, 算法成功地提取了物体的线形骨架, 骨架点位置准确, 整个骨架具有很好的连通性, 并且与原物体具有相同的拓扑结构.

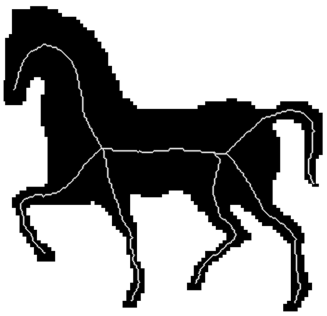


图 4 图 1 (a) 中物体的线形骨架

Fig. 4 Curve skeleton of the object shown in Fig. 1 (a)

1.5 时间复杂度分析

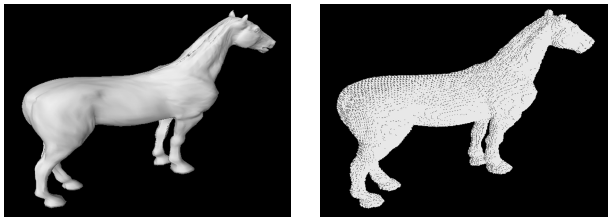
用文献 [13] 中的方法计算二值图像表示的物体的距离变换时间复杂度远小于 $\mathrm{O}(n^2)$(其中 n 是二值图像的长和宽), 用文献 [12] 中的方法计算体素表示的三维物体距离变换的时间复杂度为 $\mathrm{O}(n^3 \log_2 n)$(其中 n 是物体的长、宽和高), 计算 $|\nabla DT|$ 的时间复杂度为 $\mathrm{O}(N)$(其中 N 是物体所包含的体素或像素的个数). 在算法 1 的第 4) 步, 需要搜索两个关键点之间的梯度最短路径, 如果用经典的 Dijkstra 算法, 其时间复杂度为 $\mathrm{O}(N^2)$; 如果用诸如 A^* 等启发式算法复杂度会进一步降低. 近似地, 本文算法的时间复杂度为 $\mathrm{O}(N^2)$.

2 实验结果及讨论

我们将本文的算法应用于大量二维物体[14−15] 和三维物体[16] 的骨架提取实验. 图 5 展示了部分二维物体及其线形骨架. 由于文献 [16] 中的三维物体均为网格模型, 所以需要先对其进行体素化的处理. 图 6 展示了网格模型体素化后的结果. 图 7 展示了部分三维物体及其线形骨架. 为了便于对比得到的线形骨架与原物体, 我们在图 7 中用网格模型显示原物体. 从图中可以看到, 本文方法能够成功提取二维、三维物体的线形骨架, 得到的骨架有较好的连通性, 并能较好地表示物体的拓扑和形状特征.

图 5 一些二维物体及其线形骨架

Fig. 5 Some 2D objects and their curve skeletons



(a) 网格模型 (b) 体素模型

(a) Mesh model (b) Voxelized model

图 6 网格模型与及体素化后的模型

Fig. 6 Mesh model and the voxelized model

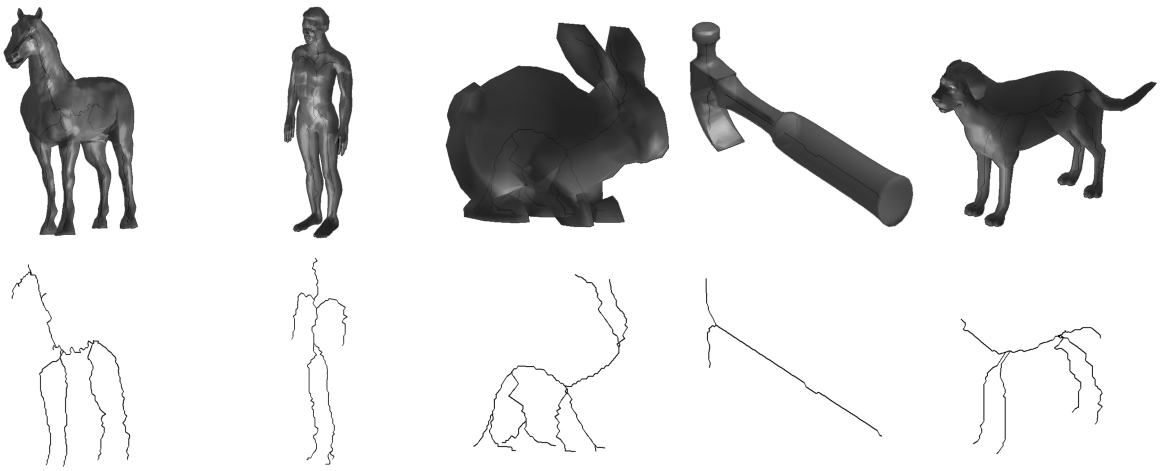


图 7 一些三维物体及其线形骨架

Fig. 7 Some 3D objects and their curve skeletons

图 8 比较了本文方法与文献 [17] 中方法提取的二维物体骨架, 图 8 (b) 是文献 [17] 方法得到的骨架, 在山羊角的中部出现了较短分支, 这些分支对表示整个物体形状特征并没有太大贡献, 反而会增加识别和匹配的复杂度. 与之相比, 本文方法得到的线形骨架 (如图 8 (a) 所示) 没有此类问题.

(a) 本文结果　　(b) 文献 [17] 的结果

(a) Result of the proposed method　　(b) Result of [17]

图 8　文献 [17] 的结果与本文结果的比较

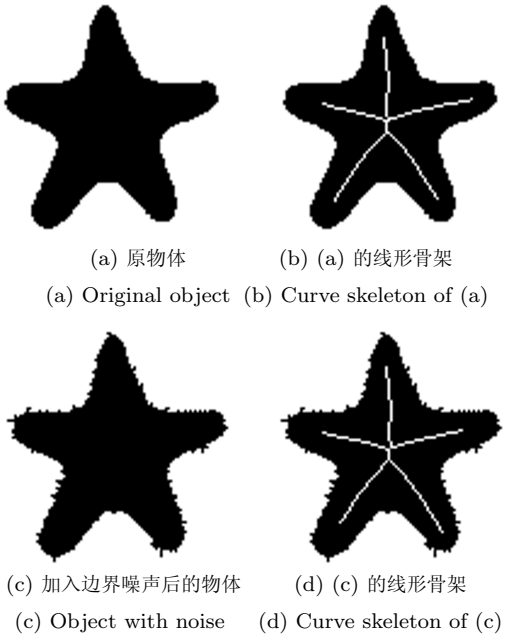
Fig. 8　Comparison between the results of the proposed method and [17]

本文算法利用了物体的距离变换及其梯度, 因此能在一定程度上克服边界噪声的影响. 图 9 (a) 是一个二维物体海星, 图 9 (b) 是它的骨架. 图 9 (c) 是图 9 (a) 随机地加入了边界噪声后的结果, 它的线形骨架如图 9 (d) 所示. 可以看到, 加入边界噪声前后骨架拓扑结构没有发生变化, 仅在形状上有些细微差别. 图 10 (a) 和 (b) 显示的是一个三维物体及其线形骨架, 图 10 (c), (e) 和 (g) 分别显示了以 1%, 5%, 10% 的概率加入边界噪声后的物体, 图 10 (d), (f) 和 (h) 分别是它们的线形骨架. 可以看到, 加入噪声后, 骨架的拓扑结构没有发生变化, 仅在平滑度上有所不同.

如果边界噪声更大一些, 可以在算法 1 的第 5) 步检查骨架分支的体素 (像素) 长度. 如果长度较小, 则不把它加入到骨架中去. 这样就能更好地克服边界噪声的影响.

3　结论

本文依据物体的距离变换及其梯度获得物体内部的关键点, 用梯度最短路径连接关键点, 得到了物体 (二维或三维) 的线形骨架, 该骨架准确地表示了物体的拓扑和形状特征, 并且不易受边界噪声干扰. 因此, 可广泛用于物体识别、检索等领域. 与现有的基于距离变换的骨架提取算法相比, 本文方法获得的线形骨架具有连通性好的优点. 此外, 由定义 5 可知不存在环状的梯度最短路径, 因此关于环状骨架的问题有待进一步研究.



(a) 原物体　　(b) (a) 的线形骨架

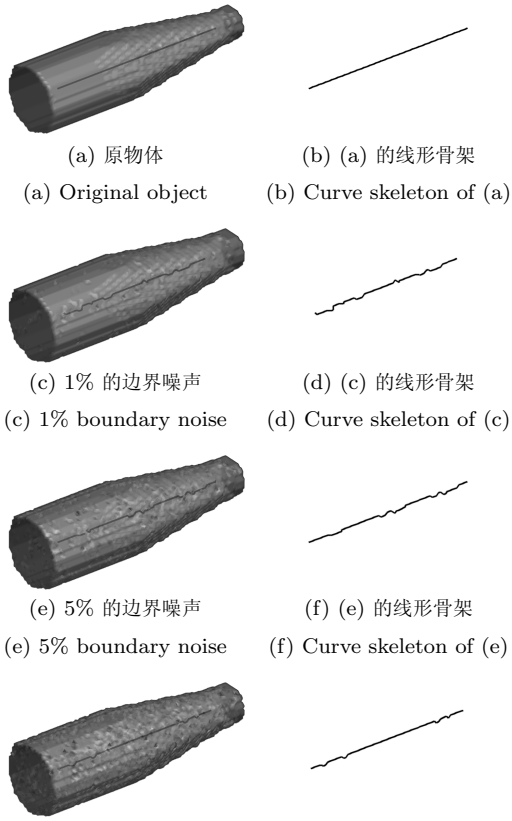
(a) Original object　(b) Curve skeleton of (a)

(c) 加入边界噪声后的物体　　(d) (c) 的线形骨架

(c) Object with noise　(d) Curve skeleton of (c)

图 9　边界噪声对二维物体线形骨架的影响

Fig. 9　Influence of boundary noise on 2D object



(a) 原物体　　(b) (a) 的线形骨架

(a) Original object　(b) Curve skeleton of (a)

(c) 1% 的边界噪声　　(d) (c) 的线形骨架

(c) 1% boundary noise　(d) Curve skeleton of (c)

(e) 5% 的边界噪声　　(f) (e) 的线形骨架

(e) 5% boundary noise　(f) Curve skeleton of (e)

(g) 10% 的边界噪声　　(h) (g) 的线形骨架

(g) 10% boundary noise　(h) Curve skeleton of (g)

图 10　边界噪声对三维物体线形骨架的影响

Fig. 10　Influence of boundary noise on 3D object

References

1 Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape. *Models for the Perception of Speech and Visual Form*. Cambridge: MIT Press, 1967. 362−380

2 Blum H. Biological shape and visual science: part I. *Journal of Theoretical Biology*, 1973, **38**: 205−287

3 Dimitrov P, Phillips C, Siddiqi K. Robust and efficient skeletal graphs. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Hitton Head Island, USA: IEEE: 2000. 417−423

4 Ma C M, Wan S Y. Parallel thinning algorithms on 3D (18, 6) binary images. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, **80**(3): 364−378

5 Xie W, Thompson R P, Perucchio R. A topology-preserving parallel 3D thinning algorithm for extracting the curve skeleton. *Pattern Recognition*, 2003, **36**(7): 1529−1544

6 Che Wu-Jun, Yang Xun-Nian, Wang Guo-Zhao. A dynamic approach to skeletonization. *Journal of Software*, 2003, **14**(4): 818−823
(车武军, 杨勋年, 汪国昭. 动态骨架算法. 软件学报, 2003, **14**(4): 818−823)

7 Choi W P, Lam K M, Siu W C. Extraction of the Euclidean skeleton based on a connectivity criterion. *Pattern Recognition*, 2003, **36**(3): 721−729

8 Ding Yi, Liu Wen-Yu, Zheng Yu-Hua. Hierarchical connected skeletonization algorithm based on distance transform. *Journal Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(4): 281−285
(丁颐, 刘文予, 郑宇化. 基于距离变换的连通骨架算法. 红外与毫米波学报, 2005, **24**(4): 281−285)

9 Chuang J H, Tsai C H, Ko M C. Skeletonization of three-dimensional object using generalized potential field. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1241−1251

10 Ahuja N, Chuang J H. Shape representation using a generalized potential field model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, **19**(2): 169−176

11 Cornea N D, Silver D, Yuan X S, Balasubramanian R. Computing hierarchical curve-skeletons of 3D objects. *The Visual Computer*, 2005, **21**(11): 944−955

12 Zhu-Ge Ying, Tian Jie, Wang Wei-Hong. A new method of three-dimensional Eeuclidean distance transform. *Journal of Software*, 2001, **12**(3): 383−389
(诸葛婴, 田捷, 王蔚洪. 三维欧氏距离变换的一种新方法. 软件学报, 2001, **12**(3): 383−389)

13 Liu Xiang-Bin, Zou Bei-Ji, Sun Jia-Guang. Fast Euclidean distance transform based on contour tracking. *Chinese Journal of Computers*, 2006, **29**(2): 317−323
(刘相滨, 邹北骥, 孙家广. 基于边界跟踪的快速欧氏距离变换算法. 计算机学报, 2006, **29**(2): 317−323)

14 Rutgers University. Rutgers university tool image database [Online], available: http://www.cs.rutgers.edu/pub/sven/rutgers-tools/, November 2, 2006

15 Siddiqi K, Shokoufandeh A, Dickinson S, Zucker S W. Shock graphs and shape matching. *International Journal of Computer Vision*, 1999, **35**(1): 13−32

16 Princeton University. Princeton shape benchmark [Online], available: http://shape.cs.princeton.edu/benchmark/, November 7, 2006

17 Liu Wen-Yu, Bai Xiang, Zhu Guang-Xi. A skeleton-growing algorithm based on boundary curve evolution. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(2): 255−262
(刘文予, 白翔, 朱光喜. 基于边界曲线演化模型的生长骨架算法. 自动化学报, 2006, **32**(2): 255−262)

刘俊涛 军械工程学院计算机工程系讲师. 主要研究方向为计算机视觉、计算机图形学和模式识别. 本文通信作者.
E-mail: ropobox@21cn.com
(**LIU Jun-Tao** Lecturer in the Department of Computer Engineering, Mechanical Engineering Institute. His research interest covers computer vision, computer graphics, and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)

刘文予 华中科技大学电子与信息工程系教授. 主要研究方向为计算机图形学、多媒体信息处理和计算机视觉.
E-mail: liuwy@hust.edu.cn
(**LIU Wen-Yu** Professor in the Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology. His research interest covers computer graphics, multimedia information processing, and computer vision.)

吴彩华 军械工程学院装备指挥与管理系博士研究生. 主要研究方向为软件保障, 软件可靠性评估, 计算机视觉.
E-mail: wucaihua_1999@yahoo.com.cn
(**WU Cai-Hua** Ph. D. candidate in the Department of Equipment Command & Management Engineering, Mechanical Engineering Institute. Her research interest covers software support, software reliability evaluation, and computer vision.)

原 亮 军械工程学院计算机工程系教授. 主要研究方向为智能检测与故障诊断、EHW 理论及实现.
E-mail: yltgzy@yahoo.com.cn
(**YUAN Liang** Professor in the Department of Computer Engineering, Mechanical Engineering Institute. His research interest covers intelligent testing and fault diagnosis, theory and implementation of EHW.)