

## 可变形带洞形状的表达与检测

黄辉<sup>1,2)</sup> 关履泰<sup>1)</sup> 龚永义<sup>3)</sup> 朱庆勇<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(中山大学科学计算与计算机应用系, 广州 510275) <sup>2)</sup>(广东商学院数学与计算科学系, 广州 510320)

<sup>3)</sup>(中山大学计算机应用研究所, 广州 510275) <sup>4)</sup>(中山大学工学院海洋工程研究中心, 广州 510275)

**摘要** 可变形形状(shape)的表达与检测是图像处理领域的重要研究内容。提出了一种关于可变形带洞形状表示与检测的方法,采用带洞形状多边形表示可变形带洞目标形状,有效地解决了带洞形状中不同封闭曲线之间位置的表示关系;通过在带洞形状多边形中添加辅助边,将每条辅助边看成两条完全不相交的边的方法,将带洞形状多边形转化成不带洞的简单多边形,运用受限 Delaunay 三角剖分法(CDT)剖分多边形,得到关于带洞形状多边形的完全删除序列,运用非序列动态规划实现可变形带洞形状检测。实验结果表明,与其他相关方法相比,本文方法能够较有效地检测带洞形状目标。

**关键词** 带洞形状(shape)多边形 辅助边 完全删除序列 非序列动态规划

**中图分类号**: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)11-2073-08

## Representation and Detection of Deformable Shapes with Holes

HUANG Hui<sup>1,2)</sup>, GUAN Lü-tai<sup>1)</sup>, GONG Yong-yi<sup>3)</sup>, ZHU Qing-yong<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Computation, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

<sup>2)</sup>(Department of Computation, Guangdong Commercial College, Guangzhou 510320)

<sup>3)</sup>(Computer Application Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

<sup>4)</sup>(Ocean Engineering Research Centre, School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

**Abstract** Representation and detection of deformable Shapes play an important role in image processing. We propose an approach to representing and detecting deformable shapes with holes. We represent those shapes using shape polygon with holes, which can also express the position relationship efficiently among different curves in those shapes. Appending aided edges what are regarded as two edges without intersection, the shape polygon with holes are transformed to a simple polygon without holes. Then, we get the perfect delete list on this simple polygon by using Constrained Delaunay Triangulation (CDT). Using the modified non-serial dynamics programming, we realize the detection of deformable Shapes. We also provide some test results to verify our algorithm.

**Keywords** shape polygon with holes, aided edge, perfect delete list, non-serial dynamics programming

### 1 引言

图像分割是计算机视觉的重要研究内容<sup>[1-14]</sup>。对于背景复杂,目标特性不明确或缺损的图像目标,传统的图像分割方法在实施上有一定困难<sup>[1-5]</sup>。某些图像需要由有经验的专家在已知目标形状

(shape)的情况下,才能较准确地将感兴趣的目标提取出来。因此,若能将这种先验形状知识结合到合适的图像分割算法中去,相信能极大地提高图像分割效率。多年来,研究人员在这方面做了大量有益的工作<sup>[6-13]</sup>,而这些工作首先面对的问题是如何有效表示先验目标形状,并与合适的分割算法结合。Felzenszwalb 给出了形状的定义<sup>[11]</sup>:除去位置、大

基金项目:国家自然科学基金项目(10572154);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0731);广东省科技攻关项目(2004B33101005)

收稿日期:2007-03-22;改回日期:2007-06-26

第一作者简介:黄辉(1968-),男,中山大学数学与计算科学学院计算数学专业博士研究生。主要研究方向为图像处理和模式识别。

E-mail: xzhuanghui@126.com

小、旋转等特性后目标的其他集合信息,指出形状应当是关于 Euclidean 相似性变换不变的<sup>[11,13]</sup>。

通常表示 2 维目标形状最直观的方法是给出目标轮廓线,但采用轮廓线表示形状,在相似性处理上及与其他图像分割算法的结合上有一定困难。Leventon 和 Tsai 等人提出用零水平集表示先验形状轮廓线,在一定程度上解决了这问题<sup>[8,9]</sup>。他们采用主元分析法 (PCA) 分析用水平集函数表示的对准后的先验形状集。Leventon 等人在此基础上导出关于先验形状的统计分布,用于限制 Geodesic 主动轮廓的演化,实现目标轮廓提取<sup>[8]</sup>。与 Leventon 不同, Tsai 等人根据形状的统计特性,设计出形状的一般水平集函数表示,与区域轮廓模型结合,实现目标的轮廓提取。

一种更简洁的形状表示方法就是由 Felzenszwalb 和 Amit 等人提出的多边形表示法<sup>[11,13]</sup>,用于近似表示先验形状。其中 Amit 等人成功地将这种表示用于解决图像配准问题,而 Felzenszwalb 将其用于解决基于形状的轮廓检测问题。Amit 和 Felzenszwalb 等人的共同之处是用多边形近似表示先验形状,对形状多边形进行三角剖分,通过控制每个三角形的相似性变形实现控制整个形状的相似性变形;在此基础上,结合图像特性,定义能量函数模型,采用非序列动态规划算法进行能量最优化。算法的关键步骤是对形状多边形进行三角剖分,得到关于剖分后形状多边形顶点的完全删除序列。但 Felzenszwalb 的研究是针对不带洞的形状,未提出关于可变形空洞目标的处理方法,事实

上,对于带洞的形状多边形,采用这种方法并不能直接得到关于多边形顶点的完全删除序列,因此不能实现带洞目标检测。

针对上述问题,给出一种带洞形状目标的轮廓提取方法,实现了可变形带洞形状表示与检测。

## 2 带洞形状多边形的三角剖分

用一个多边形集近似表示带洞目标形状,它的特点是存在唯一一个多边形,包含所有其他多边形(图 1(d)所示)。为方便起见,将用于表示带洞目标形状的多边形集称为带洞形状多边形。

Felzenszwalb 用受限 Delaunay 三角剖分法 (CDT) 剖分简单无洞形状多边形(图 1(a)), 所得三角网格图(图 1(b))的对偶图是  $k$  叉树(图 1(c)), 对偶图的每个节点都是所对应三角形的内心,并建立完全删除序列。完全删除序列的特点是根据序列中顶点的顺序,依次每删除一个顶点时(过该顶点的边也同时删除),三角剖分图中正好依次只有一个三角形被删除,余下部分仍然构成原多边形的部分三角剖分,这是运用非序列动态规划 (non-serial dynamic programming) 优化算法的基础;但若将 CDT 直接用于带洞形状多边形,尤其是多空洞的多边形的剖分(图 1(d)), 所得三角剖分图的对偶图中存在环,不再是  $k$  叉树(图 1(f)), 也就是说,三角剖分图是不可分解的,因此不能得到 Felzenszwalb 要求的完全删除序列。

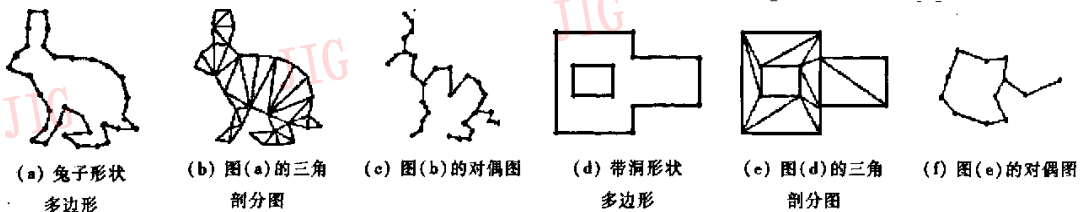


图 1 CDT 三角剖分

Fig. 1 Constrained delaunay triangulation

给出一种处理带洞多边形 CDT 剖分的方法:对带洞形状多边形,先添加辅助边,然后再采用 CDT 进行三角剖分。辅助边的作用是消除多边形内部所含的洞。

为便于叙述,引进文献[11]中可视性概念。给定多边形  $P$ , 称点  $a$  对点  $b$  是可视的,如果线段  $ab$  完全在多边形  $P$  内;类似,称点  $a$  对于线段  $bc$  是可

视的,若点  $a$  对线段  $bc$  上的某些点是可视的。

另外,给出可达性概念。称点  $a$  对点  $b$  是可达的,若多边形  $P$  中存在首尾相连的边,连接点  $a$  与点  $b$ , 否则称点  $a$  与点  $b$  是相互不可达的。CDT<sup>[11]</sup> 要求得到的关于多边形三角剖分图的任意边的端点是互相可视的,且存在通过该边端点,不包含其他对该边是可视的多边形上的顶点的圆。

**定义 1** 辅助边是指连接多边形上互相可视,但不可达的两个顶点而产生的边;若在多边形中存在两条或两条以上辅助边,则它们至多只能在边的端点处相交。

由此,可以给出带洞形状多边形  $P$  的 CDT 三角剖分算法。

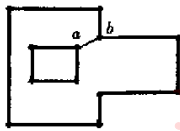
**算法 1**

(1) 遍历多边形  $P$  的所有顶点,若存在顶点是不可达的,添加合适的辅助边,使它可达;重复此步,直至多边形中所有顶点是互相可达的;

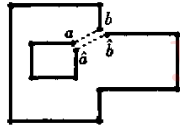
(2) 处理每一条辅助边  $ab$ ,将它看成是两条完全不相交的边  $ab$  与  $\hat{a}\hat{b}$ (仍称为辅助边, $a$  与  $\hat{a}$ , $b$  与  $\hat{b}$  事实上是重合的),得到不含洞的新多边形  $\hat{P}$ ;

(3) 依据 CDT 规则,对多边形  $\hat{P}$  进行三角剖分,将剖分图  $\hat{T}$  作为  $P$  的剖分图。

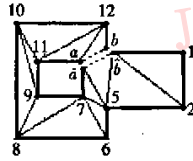
由于多边形  $\hat{P}$  不含洞,因此关于  $\hat{P}$  的 CDT 三角剖分图  $\hat{T}$  的对偶图一定是  $k$  叉数(图 2(d)),可以设计出完全删除序列。如图 2(a) 的完全删除序列是  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, (v_k, v_a)$ 。



(a) 在图 1(d) 中添加辅助边  $ab$



(b) 将辅助边  $ab$  看成两条完全不相交的边  $ab$  和  $\hat{a}\hat{b}$ ,得到不含洞形状多边形



(c) 用 CDT 对多边形(b)剖分



(d) 图(c)的对偶图

图 2 带洞形状多边形与辅助边

Fig. 2 Shape with holes and aid edges

但是必须特别注意,由于将每条辅助边看成是两条完全不同的边,因此,对每条辅助边的端点而言,在完全删除序列中会出现两次(如图 2(a) 的完全删除序列中点  $v_a$  和  $v_{\hat{a}}$ ,  $v_b$  和  $v_{\hat{b}}$ )。

**3 可变形带洞形状检测**

典型的基于先验目标形状的目标检测能量函数模型主要由图像特性项和变形控制项两部分组成,即

$$E = E_{\text{image}} + \lambda E_{\text{deform}} \quad (1)$$

$E_{\text{image}}$  是图像特性项,描述图像特征,目的是确保将形状轮廓线准确引向图像目标轮廓线。比如,对于亮度图像,认为图像梯度愈大处,愈可能是边缘,可以将  $E_{\text{image}}$  定义为沿形状轮廓线  $\partial C_B$  梯度函数的积分。 $E_{\text{deform}}$  是变形控制项,作为先验知识,先验形状已限定待检测图像目标的基本轮廓,它的目的是控制被检测出的图像目标形状与先验形状的相似度, $\lambda$  是权,控制变形控制项在能量函数中的比重。

我们已提出用带洞形状多边形表示先验带洞形状。如何将先验带洞形状多边形知识融入能量函数式(1)成为问题的关键。下面给出具体的能量函数

模型。

**3.1 能量函数**

设  $\hat{P}$  是先验带洞形状多边形  $P$  按算法 1 处理得到的简单多变形, $\hat{T}$  是  $\hat{P}$  对应的 CDT 三角剖分图, $I(x, y)$  是定义在域  $\Omega \subset R^2$  上的亮度图像,映射  $f: \hat{P} \rightarrow \Omega$  是连续函数,将多边形  $\hat{P}$  边及其内部点映射到图像平面,映射像记为  $f(\hat{P})$ 。

与文献[11]~[13]类似,将基于先验形状的目标检测转化成如何设计一个好的函数  $f$ ,使得  $f(\hat{P})$  正好完全覆盖图像中的相应目标。事实上,由于多边形的固有点及相似性要求,只要确定  $\hat{P}$  中每个顶点在图像区域  $\Omega$  上的像,  $f(\hat{P})$  就完全确定,因此只需考虑关于  $\hat{P}$  的顶点到图像区域  $\Omega$  上的映射:  $g: V \rightarrow \Omega, V = \{v | v \text{ 是多边形 } \hat{P} \text{ 的顶点}\}$ 。设  $\hat{T}$  是  $\hat{P}$  对应的三角剖分,则每个三角形  $(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}$  的像为三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k)), v_i, v_j, v_k \in V$ 。这样,  $\hat{P}$  与  $f(\hat{P})$  的相似性,可以通过每个三角形  $(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}$  与三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  的相似性来描述。因此,先验形状的相似性变形问题简化为设计合适的映射  $g$ ,确保所有三角形  $(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}$  与它的像三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  的相似性。为便于描述,下面直接用  $g(\hat{P})$  表示形状多边形  $\hat{P}$  所围区域在图像区域上的映射区域,  $\partial g(\hat{P})$  表示映射区域的

轮廓线,即被检测目标形状。显然

$$g(\hat{P}) = \cup_{(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}} (g(v_i), g(v_j), g(v_k))$$

这里  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  表示三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  所围成的区域,即  $g(\hat{P})$  是由  $\hat{T}$  中所有三角形的像三角形组成。从而先验形状  $\hat{P}$  与被检测目标形状  $\partial g(\hat{P})$  间的相似度,可以借助  $\hat{P}$  所对应三角剖分图中所有三角形  $(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}$  与其像三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  的相似性来度量。

沿用 Felzenszwalb<sup>[11]</sup> 和 Amit<sup>[13]</sup> 的相似性测度,度量两相似三角形,即相似三角形对应边长度成比例。为此,引进测度<sup>[13]</sup>

$$J(g, v_i, v_j, v_k) = (\log(r_1/r_2) - \log(l_1/l_2))^2 + (\log(r_2/r_3) - \log(l_2/l_3))^2 + (\log(r_3/r_1) - \log(l_3/l_1))^2$$

其中,  $(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}$ ,  $r_t, l_t$  分别是  $(v_i, v_j, v_k)$  与它的像三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  对应边长度,  $t=1, 2, 3$ 。当两三角形完全相似时,  $J(g, v_i, v_j, v_k) = 0$ 。但我们必须注意到,  $J(g, v_i, v_j, v_k)$  很小的两相似三角形却可能有不同的方向(图 3, 图 4(c), (d)), 这是必须避免的。通过限定三角形与像三角形必须是同方向,来避免这种状态发生。另外在现实中,也通常将方向不同的目标,如人的左右手形状(图 4(a),

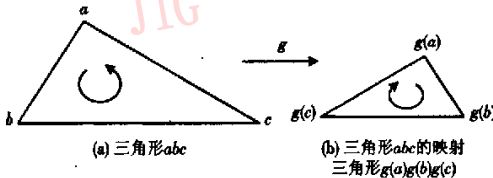
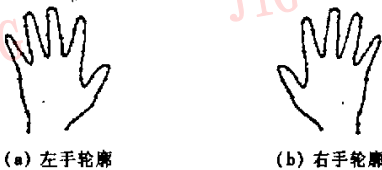


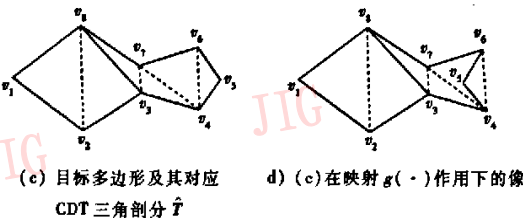
图 3 变异三角形映射

Fig. 3 Exception of the triangle mapping



(a) 左手轮廓

(b) 右手轮廓



(c) 目标多边形及其对应 CDT 三角剖分  $\hat{T}$

(d) (c) 在映射  $g(\cdot)$  作用下的像

图 4 相似性测度为零,但形状并不相似示例

Fig. 4 Two examples that shapes is not similar, but their similar measure equal zero

(b)), 看成是不同的目标,因此完全有理由要求  $\hat{T}$  中任意两个三角形的像必须是同方向的。

根据点乘、叉乘性质可知,三角形  $abc$  与  $ABC$  同方向的充分必要条件是向量  $\vec{ab} \times \vec{ac}$  与  $\vec{AB} \times \vec{AC}$  同向,即  $(\vec{ab} \times \vec{ac}) \cdot (\vec{AB} \times \vec{AC}) > 0$ 。据此,限定映射  $g$  为能保证  $\hat{T}$  中任意两个三角形的映射三角形是同方向的映射。由此,可以重新定义相似性测度为

$$J(g, v_i, v_j, v_k) = \begin{cases} (\log(r_1/r_2) - \log(l_1/l_2))^2 + (\log(r_2/r_3) - \log(l_2/l_3))^2 + (\log(r_3/r_1) - \log(l_3/l_1))^2 & \text{与像三角形同向} \\ +\infty & \text{其他} \end{cases}$$

将变形控制项定义为

$$E_{\text{deform}} = \sum_{(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}} J(g, v_i, v_j, v_k) \quad (2)$$

根据不同特征图像,可以定义不同的图像特性项。假设图像  $I(x, y)$  是非纹理亮度图像,将图像特性项定义为

$$E_{\text{image}} = \int_{\partial g(\hat{P})} h(\|\nabla I(v)\|) dv \quad (3)$$

其中,  $h(\cdot)$  是非负减函数,  $\nabla I(v)$  表示图像函数在点  $v$  处的梯度。当  $E_{\text{image}}$  最小时,可以认为  $\partial g(\hat{P})$  处于图像中梯度整体变化最大处。

由式(2)和式(3)得到基于先验形状的图像目标检测能量函数  $E(g, P)$ ,  $E(g, P)$  最小时,检测到目标。

$$E(g, P) = \sum_{(v_i, v_j, v_k) \in \hat{T}} \lambda J(g, v_i, v_j, v_k) + \int_{\partial g(\hat{P})} h(\|\nabla I(v)\|) dv \quad (4)$$

### 3.2 最优化算法

通过非序列动态规划(non-serial dynamic programming)的方法<sup>[11]</sup>解决式(4)的最优化问题。运用算法 1,得到关于带洞形状多边形  $P$  的三角剖分  $\hat{T}$  及完全删除序列。当删除到完全删除序列中点  $v_i$  时,相应  $\hat{T}$  的剩余部分中仅有一个三角形包含该顶点。设  $v_i$  与顶点  $v_j$  和  $v_k$  组成该三角形,不妨称  $v_j$  和  $v_k$  是  $v_i$  的父顶点,它们的下标分别存入  $Pt[i].a$  与  $Pt[i].b$ 。这时  $v_i$  的像  $g(v_i)$  的最佳位置仅与点  $v_j$  和  $v_k$  的像  $g(v_j), g(v_k)$  及其对应三角形像所围图像边缘特性相关。设  $u_i, u_j, u_k$  分别是三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  的顶点  $g(v_i), g(v_j), g(v_k)$ 。  $u_i, u_j, u_k$  一旦确定,映射  $g(\cdot)$  就确定,因此用  $J(v_i, v_j, v_k, u_i, u_j, u_k)$  表示  $J(g, v_i, v_j, v_k)$ 。若已知  $u_j, u_k$ , 则可以通过函数  $V_i(u_j, u_k)$  确定  $u_i$ 。

$$V_i(u_j, u_k) = \min_{v_i \in \partial} \left[ J(v_i, v_j, v_k, u_i, u_j, u_k) + \lambda \int_{\partial g(\hat{P}) \cap \partial(u_i, u_j, u_k)} h(\|\nabla I(v)\|) dv + V_i(u_i, u_j) + V_i(u_i, u_k) \right]$$

其中,  $\partial(u_i, u_j, u_k)$  表示三角形  $(g(v_i), g(v_j), g(v_k))$  的边。

由于通过添加辅助边实现带洞多边形的 CDT 剖分, 每条辅助边  $ab$  被看成两条不相交的边  $ab, \hat{a}\hat{b}$ , 分别存在于  $\hat{T}$  的两个不相交三角形  $(v_i, a, b)$  和  $(v_k, \hat{a}, \hat{b})$  中, 因此还必须在确保能量函数最优的同时, 边  $ab$  的映射与  $\hat{a}\hat{b}$  的映射始终是重合的。以图 5 为例, 给出相应算法。

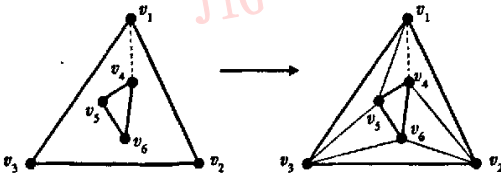


图 5 带洞先验形状多边形及其 CDT 剖分图

Fig. 5 Prior shape with holes and the CDT

为方便起见, 将  $J(v_i, v_j, v_k, u_i, u_j, u_k)$  简记为  $J(w_i, w_j, w_k)$ , 其中,  $w_i$  为  $(v_i, u_i)$ , 同时将梯度信息也融入其中, 则它的能量函数可以简化表示为

$$E(g, P) = J_1(w_1, w_2, w_4) + J_2(w_4, w_2, w_6) + J_3(w_2, w_3, w_6) + J_4(w_6, w_3, w_5) + J_5(w_3, w_1, w_5) + J_6(w_5, w_1, w_4)$$

由于边  $v_1, v_4$  与  $\hat{v}_1, \hat{v}_4$  事实上是一条边, 因此能量函数又可表示为

$$E(g, P) = J_1(w_1, w_2, w_4) + J_2(w_4, w_2, w_6) + J_3(w_2, w_3, w_6) + J_4(w_6, w_3, w_5) + J_5(w_3, w_1, w_5) + J_6(w_5, w_1, w_4)$$

能量最优化的具体步骤如下:

- (1) 给定点  $u_1, u_4$ ,
- ① 对每个  $u_2, V_1(u_2) = J_1(w_1, w_2, w_4)$ ;
- ② 对每对  $u_2, u_6$ ,
$$V_2(u_2, u_6) = J_2(w_4, w_2, w_6) + V_1(u_2);$$
- ③ 对每对  $u_3, u_6$ ,
$$V_3(u_3, u_6) = \min_{i_2} (J_3(w_2, w_3, w_6) + V_2(u_2, u_6));$$
- ④ 对每对  $u_3, u_5$ ,
$$V_4(u_3, u_5) = \min_{u_6} (J_4(w_6, w_3, w_5) + V_3(u_3, u_6));$$
- ⑤ 对每个  $u_5$ ,

$$V_5(u_5) = \min_{i_5} (J_5(w_3, w_1, w_5) + V_4(u_3, u_5));$$

$$\textcircled{6} V_6 = \min_{u_5} (J_6(w_5, w_1, w_4) + V_5(u_5)).$$

(2)  $\min E(g, I) = \min_{u_1, u_4} V_6$ ; 回溯, 计算出每个顶点的映射。

假设图像像素数为  $m$ , 则上述算法的计算复杂度为  $O(m^5)$ , 且每多一条辅助边, 复杂度增加  $m^2$ , 这在实际运用中是无法忍受的。依据前文分析, 将变换  $g(\cdot)$  限制为相似性变换, 通过将边  $ab$  的映射与  $\hat{a}\hat{b}$  的映射的加权平均坐标作为它们的实际坐标来避开这困难。

由上, 给出关于式(4)的次优化算法, 如下:

算法 2

(1) for( $i = 1; i \leq n + m - 2; i++$ ) //  $n$  是带洞形状多边形顶点数

{ 删除完全删除序列中第  $i$  个顶点;

$j \leftarrow Pt[i].a, k \leftarrow Pt[i].b$ ; // 获取第  $i$  个顶点的父顶点下标

for(图像  $I$  中每对像素坐标  $u_j$  和  $u_k$ ) // 分析父顶点的所有可能坐标

$$\left\{ \begin{aligned} V_i(u_j, u_k) &= \min_{i_1} \left[ \lambda J(v_i, v_j, v_k, u_i, u_j, u_k) \right. \\ &+ \left. \int_{\partial g(\hat{P}) \cap \partial(u_i, u_j, u_k)} h(\|\nabla I(v)\|) dv + V_i(u_i, u_j) + V_i(u_i, u_k) \right] \end{aligned} \right\}$$

(2) 最小化  $V[n + m - 1, n + m](u_{n+m-1}, u_{n+m})$ , 然后依据  $V_i(u_j, u_k)$  回溯, 计算出每个顶点的映射;

(3) 遍历所有顶点, 将每条辅助边  $ab$  端点  $v_a, v_b$  的实际映射取为

$$g(v_a) = \lambda_1 g(v_a) + \lambda_2 g(v_b)$$

$$g(v_b) = \lambda_1 g(v_b) + \lambda_2 g(v_a)$$

其中,  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

### 4 实验与评价

图像目标轮廓提取是图像处理的重要内容。在不知目标大体形状的情况下, 传统的图像分割算法可能无法正确提取复杂图像中目标轮廓线(如图 6(a)、(c)所示)。将目标的先验知识融合入图

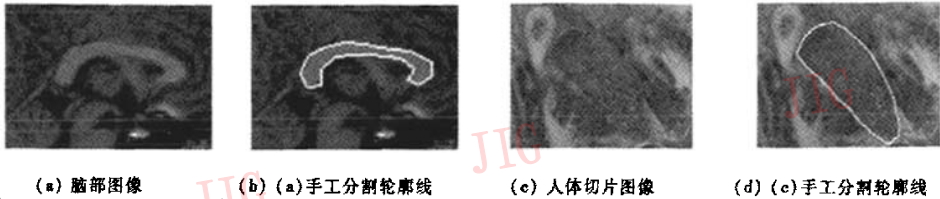


图 6 人工分割示例

Fig. 6 Example of image segmentation by user self

像分割算法中,一定程度上解决了上述问题。

实验采用 CPU 是迅驰 Celeron 1500MHz,内存是 240M 的 PC 机,操作系统是 Windows XP,所采用编程语言是 Visual C++ 6.0。

必须特别说明的是,为方便起见,实验中所采用的目标先验形状多边形都是直接依照待分割目标绘制出来的,似乎先验形状约束过于严格,但事实上并非如此。因为我们是采用动态规划进行遍历优化,这不同于与初值有关的迭代优化。

首先,设定模型式(4)所涉及参数值。 $\lambda$  表示图像梯度特性对能量函数的影响程度,这里令  $\lambda = 1$ ;为方便起见,令  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1/2$ 。考虑到动态规划算法的运算复杂度,在实际运算中先对图像进行预处理,尽可能缩小可变形形状多边形顶点

的取值范围,并假设绝大多数顶点落在梯度变化剧烈处。

图 7(a)是一幅人工合成图像,待分割目标是带洞的。一般情况下,会将它们看成两个不同的目标,它们的共同特点是轮廓线由多条互不相交的封闭曲线组成。因此无法用一个简单多边形(图 7(b))完整表示目标的形状,因此采用文献[11]进行分割,不能得到合理的分割结果(图 7(d))。运用带洞形状多边形(图 7(c))表示目标形状,即用多个简单多边形表示这类目标的形状。带洞形状多边形的特点是它不仅能表示含洞目标形状,同时给出了形状多边形所含不同简单多边形之间的位置关系,这相当重要。图 7(e)是分割效果,表明算法 2 能根据先验知识,正确分割目标。

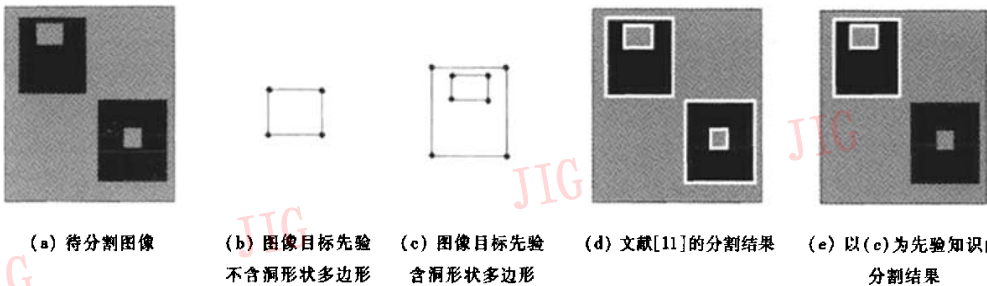


图 7 基于带洞与不带洞先验形状分割比较

Fig. 7 Comparison of the prior shape image segmentation with and without holes

图 8 给出颈部血管切片图。目标与背景对比度不强,有噪音干扰。由于血管壁相对较厚,我们采用带洞形状多边形表示先验知识图(8(b)),运用算法 2 较准确地提取目标轮廓线。

本文方法可以提取带多洞目标轮廓。图 9(a)、(d)取自人体头部切片图像,背景比较复杂,并有一定的噪音,尤其是器官(图 9(a)),更是含 3 个不规则洞。在医务人员的帮助下,首先分别给出相应目标的先验带洞形状多边形(图 9(b)、(e)),然后依据

算法 2 处理,图 9(c)、(f)是相应的分割结果。

图 10 和图 11 的共同特点是待分割目标轮廓清晰,但背景区域梯度变化也相当剧烈,目标部分区域甚至被边缘特性明显的其他物体覆盖,因此传统的边缘检测方法对此无能为力。由于目标带洞,用带洞形状多边形给出目标的先验形状,运用算法 2 处理,能够较准确地提取目标的完整轮廓线。

上述实验结果表明,本文算法能够较合理地利用先验含洞形状知识,有效地提取目标轮廓线。



图 8 基于带洞形状的目标检测

Fig. 8 Object detection based on prior shape with holes

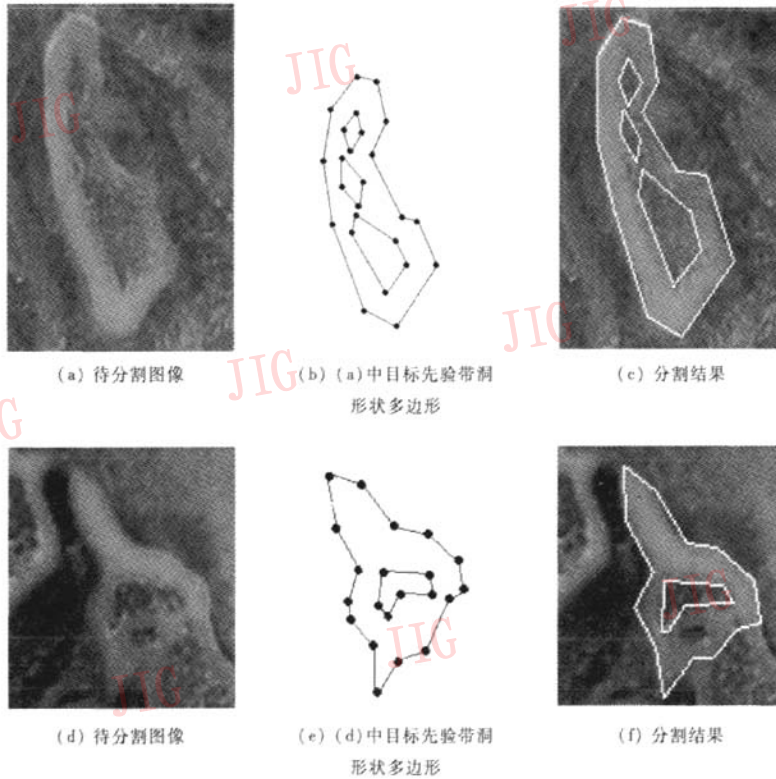


图 9 基于带洞形状的目标检测

Fig. 9 Object detection based on prior shape with holes

但在实验的过程中,也注意到,由于最后采用动态规划方法实现能量函数的次优化,尽管采用了一些加速手段,运算效率依然无法令人满意。有些分割甚至耗费几个小时。

### 5 结 论

提出了一种基于可变形带洞形状多边形的轮廓提取方法,该方法可以看成是文献[11]的补充和延

伸,能够较有效地实现带洞目标的轮廓提取。但由于动态规划方法的固有特点,同文献[11]一样,本文算法运算效率同样无法令人满意,而更多地停留在理论层次。另外,由于固定顶点数的多边形不能很好地近似表示大曲率曲线,因此,本文算法不能有效检测大曲率目标。

下一步的工作重点是着重研究如何进一步提高运算效率,如何实现基于可变形带洞形状多边形的大曲率目标轮廓检测。

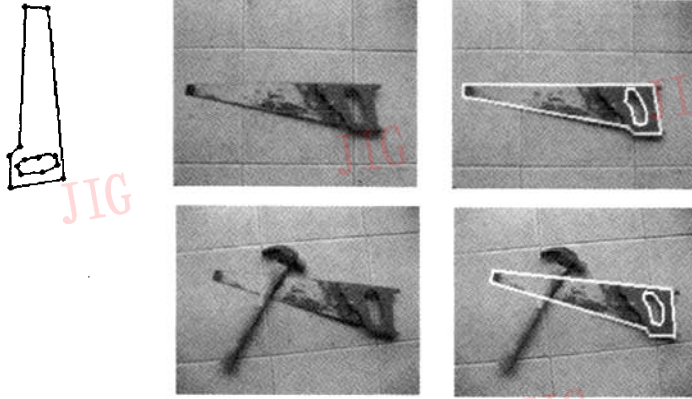


图 10 基于带洞形状的目标检测

Fig. 10 Object detection based on prior shape with holes

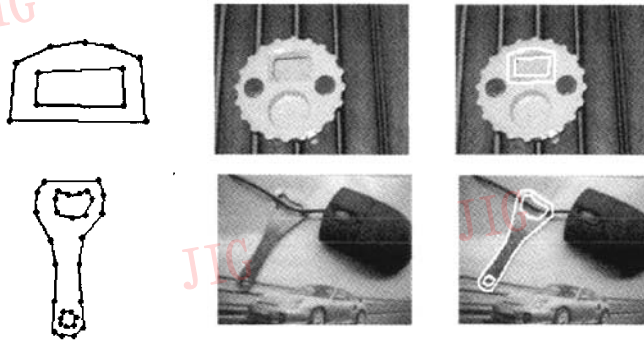


图 11 基于带洞形状的目标检测

Fig. 11 Object detection based on prior shape with holes

## 参考文献 (References)

- 1 Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(4): 321 ~ 331.
- 2 Malladi R, Sethian J A, Vemuri B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(2): 158 ~ 175.
- 3 Caselles V, Kimmel R, Sapiro G. Geodesic active contours [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(1): 61 ~ 79.
- 4 Chan T F, Vese L A. Active contours without edges [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(2): 266 ~ 277.
- 5 Paragios N, Deriche R. Geodesic active contours and level sets for the detection and tracking of moving objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(3): 266 ~ 280.
- 6 Xie X, Majid Mirmehdi. RAGS: region-aided geometric snake [J]. *IEEE Transactions on Image processing*, 2004, 13(5): 640 ~ 652.
- 7 Mukherjee D P, Ray N, Acton S T. Level set analysis for leukocyte detection and tracking [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 562 ~ 572.
- 8 Leventon M E, Crimson W E L, Faugeras O. Statistical shape influence in geodesic active contours [A]. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, 2000, 1: 316 ~ 323.
- 9 Tsai Andy, Yezzi A J, Wells W, et al. A shape-based approach to the segmentation of medical imagery using level sets [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2003, 22(2): 137 ~ 154.
- 10 Cremers D, Kohlberger T, Schnörr C. Shape statistics in kernel space for variational image segmentation [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(9): 1929 ~ 1943.
- 11 Felzenszwalb P F. Representation and detection of deformable shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(2): 208 ~ 220.
- 12 Chang T L, Liu T L. Detecting deformable objects with flexible shape priors [A]. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition [C]*, Cambridge, UK, 2004, 4: 23 ~ 26.
- 13 Amit Y, Kong A. Graphical templates for models registration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(3): 225 ~ 236.