

文章编号 1004-924X(2008)02-0308-06

应用短程线主动轮廓线的图像多目标面积同时测量

赵 鹏¹,倪国强¹,浦昭邦²,张田文³

(1.北京理工大学 光电工程系,北京 100081;

2.哈尔滨工业大学 自动化测量与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001;

3.哈尔滨工业大学 计算机科学与工程系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种新颖的图像多目标面积同时测量的方法,用于精确测量多个不同形状的图像目标面积。该方法应用了短程线主动轮廓线模型,分 2 个步骤进行。首先利用水平集函数 φ 的迭代使主动轮廓线由初始位置向各个目标的轮廓边缘收敛。其次,对于收敛后的主动轮廓线,分别计算出各目标边界的亚像素面积和图像目标的内部像素个数,从而同时求出各个图像目标的面积。实验结果表明,该方法的测量重复性误差 $< \pm 0.5\%$;和传统的面积测量方法相比,具有测量效率高(同时测量多个目标面积)和测量精度高的优点。

关键词:视觉检测;图像测量;面积计算;短程线主动轮廓线

中图分类号:TP391;TB92 **文献标识码:**A

Simultaneous measurement of area for multiple image objects based on geodesic active contour

ZHAO Peng¹, NI Guo-qiang¹, PU Zhao-bang², ZHANG Tian-wen³

(1. *Department of Photoelectric Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2. *Department of Automation Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

3. *Department of Computer Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

Abstract: A novel scheme to the area measurement of multiple image objects is proposed for simultaneous and exactly measurement of multiple objects' areas with different shapes. By using a model of geodesic active contour, this scheme consists of two steps. Firstly, the active contour converges from an initial position to the object's contour edge via the iteration of level set functional φ . Secondly, for the converged active contour, a sub-pixel area and the number of internal pixels of image objects are computed to obtain every object's area simultaneously. The experimental results indicate that measurement repetition error of proposed scheme can be decreased to $\pm 0.5\%$. Compared to conventional area measurement schemes, this scheme has highly efficient and highly accurate.

Key words: visual detection; image measurement; area computation; geodesic active contour

1 引言

视觉检测技术是以现代光学为基础,融计算机图形学、计算机视觉、信号处理、光电子学和模式识别等为一体的现代检测技术,在现代工业测试中已得到了广泛应用^[1-3]。图像目标像素面积的测量(指图像目标所包含的像素数目)是图像几何量测量的一项重要内容,它的计算方法分为两大类,即具有规则几何形状的目标和任意不规则形状的目标面积计算问题。对于前者,可以采用从目标重心到轮廓点的积分或者通过角点检测后再应用面积公式计算^[4]。对于后者,可以采用对曲线包围的内部像素计数来求解^[5],国内外文献介绍了一些改进的方法,但是这些方法在图像存在各种噪声和目标内部具有复杂边缘时将产生较大误差。

主动轮廓线是一种高度可变形数学模型^[6],考虑到主动轮廓线的高度可变形特点,近几年研究人员尝试将其应用于具有不规则形状的图像目标像素面积测量中。例如,P. Plassmann 与 T. D. Jones 应用主动轮廓线计算人腿部溃疡图像的溃疡像素面积,作为监测溃疡治疗效果的一项指标^[7-8]。在文献[9]中,本文作者曾设计了一种基于动态轮廓线模型的图像目标像素面积测量方法。动态轮廓线是通过 B 样条曲线来表达的,因此,对于收敛到目标轮廓边缘的动态轮廓线,应用 B 样条封闭曲线的面积计算公式可以一步求解出面积^[10],不需要用像素计数的复杂循环过程。但是,上述基于主动轮廓线和动态轮廓线的面积测量方法都存在一个共同的局限性,即它们只能测量单个图像的目标面积。对于图像中的多个目标,这些方法不能够同时进行测量,而只能依次进行测量,从而使得这些方法的测量效率很低。

本文提出了一种基于短程线主动轮廓线模型的多目标面积同时测量方法,该方法充分利用了短程线主动轮廓线模型的拓扑独立性,可以同时检测出多个图像目标并且进行面积测量,极大地提高了测量效率。

2 短程线主动轮廓线

短程线主动轮廓线是一种特殊形式的主动

轮廓线,它以曲线进化理论和水平集方法为基础,将平面曲线表示为定义在更高维空间的隐式函数的零水平集^[11-12]。该水平集函数的进化是根据偏微分方程(Partial Differential Equation, PDE)进行的。与传统的基于能量极小化的参数型主动轮廓线比较,短程线主动轮廓线本身能够进行分裂与合并处理,曲线的拓扑结构改变可以被自动处理,因此这种主动轮廓线模型能够同时检测图像中的多个目标。

2.1 基于传统水平集的短程线主动轮廓线

在水平集方法中,主动轮廓线是用水平集函数 $\varphi(t, x, y)$ 的零水平集来表达的,这里的零水平集表示为 $C(t) = \{(x, y) | \varphi(t, x, y) = 0\}$,水平集函数的进化方程如下:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + F |\nabla \varphi| = 0, \quad (1)$$

式中 F 称为速度函数。在主动轮廓线的进化过程中,需要不断地重新初始化水平集函数 φ 使得主动轮廓线稳定收敛。在实际应用中,重新初始化 φ 存在一些问题,例如何时进行初始化和怎样将 φ 初始化为符号距离函数还没有得到完美解答^[13]。因此, Li Chunming 等人提出了一种基于变分水平集的短程线主动轮廓线模型,它不再需要重新初始化 φ , 具有较快的进化速度^[13]。本文使用了这种短程线主动轮廓线,并且进行了相应扩展将其应用于多目标面积测量中。下面简要论述该模型的基本原理。

2.2 基于变分水平集的短程线主动轮廓线

在曲线进化过程中,应该使水平集函数 φ 近似为符号距离函数,即满足条件 $|\nabla \varphi| = 1$ 。因此,文献[13]定义了下面的内部能量项:

$$P(\varphi) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla \varphi| - 1)^2 dx dy. \quad (2)$$

此外,定义了下面的外部能量项^[13]:

$$\epsilon_{g, \lambda, \nu}(\varphi) = \lambda L_g(\varphi) + \nu A_g(\varphi), \quad (3)$$

$$L_g(\varphi) = \int_{\Omega} g \delta(\varphi) |\nabla \varphi| dx dy, \quad (4)$$

$$A_g(\varphi) = \int_{\Omega} g H(-\varphi) dx dy, \quad (5)$$

式中 λ, ν 为相应参数, $\delta(\varphi)$ 为迪拉克函数。内部能量项使 φ 逼近符号距离函数,外部能量项使零水平集函数 φ 产生的轮廓线逼近图像目标轮廓边缘。设待检测图像为 I ,公式(4)、(5)中的 g 定义为关于梯度的边缘检测函数:

$$g=1/(1+|\nabla G_\sigma * I|^2), \quad (6)$$

上式中 G_σ 为标准差为 σ 的高斯核函数。总能量函数定义为内部能量项和外部能量项的和:

$$\varepsilon(\varphi)=\mu P(\varphi)+\varepsilon_{g,\lambda,\nu}(\varphi). \quad (7)$$

最终的水平集函数的进化方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = & \mu \left[\Delta \varphi - \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \right] + \\ & \lambda \delta(\varphi) \operatorname{div} \left(g \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) + \nu g \delta(\varphi). \quad (8) \end{aligned}$$

应用中心差分法和前向差分法,式(8)的数值解法迭代公式如下^[13]:

$$\varphi_{i,j}^{k+1} = \varphi_{i,j}^k + \tau L(\varphi_{i,j}^k), \quad (9)$$

其中的 $L(\varphi_{i,j}^k)$ 是公式(8)右边的数值近似, τ 为时间步长。

3 面积测量

考虑到短程线主动轮廓线模型的多目标检测能力,将其应用于图像多目标像素面积的测量,本文设计了一种新颖的亚像素多目标面积同时测量方法。具体的实现步骤如下:

(1)对于待检测图像 I ,应用文献^[13]的变分型短程线主动轮廓线进行多目标检测,使得主动轮廓线收敛到各自的目标轮廓边缘。统计图像 I 的背景像素(非目标像素),使用以下方法:如果当前处理像素 $p(x,y)$ 的水平集函数值 $\varphi(x,y) > 0$,则该像素为背景像素。

(2)对于各图像目标,分别统计目标内部的像素个数,使用以下方法:如果当前处理像素 $p(x,y)$ 的水平集函数值 $\varphi(x,y) < 0$,并且该像素的上下左右四邻域像素的水平集函数值均 < 0 ,那么该像素为图像目标内部像素。这样该像素将作为 1 个面积单位加入到该图像目标的面积中。

(3)对于各图像目标,分别统计目标边界的像素个数,使用以下方法:如果当前处理像素 $p(x,y)$ 的水平集函数值 $\varphi(x,y) < 0$,并且该像素的上下左右四邻域像素中至少有一个像素的水平集函数值 > 0 ,那么该像素为图像目标边界像素。

(4)对于各图像目标的边界像素 $p_1(x_1, y_1)$,在该像素上下左右四邻域中找到背景像素 $p_2(x_2, y_2)$,进行线性插值计算出使水平集函数值 $\varphi(x_0, y_0) = 0$ 的亚像素坐标 $p_0(x_0, y_0)$,在此基础上进行相应的亚像素面积计算。例如,设边界像

素 $p_1(x_1, y_1)$ 的上部像素为背景像素 $p_2(x_2, y_2)$,如图 1 所示(这里将像素设为具有长和宽的矩形区域)。通过线性插值计算出使水平集函数值 $\varphi(x_0, y_0) = 0$ 的亚像素坐标 $p_0(x_0, y_0)$ 。根据该坐标 $p_0(x_0, y_0)$ 计算出相应的亚像素面积(图 1 中的阴影部分)。如果背景像素位于边界像素的下部、左部或右部,相应的计算与上部情形类似,这里省略。

(5)在分别计算出各图像目标的内部像素个数和目标边界的亚像素面积以后,将二者相加就得到各图像目标的像素面积。

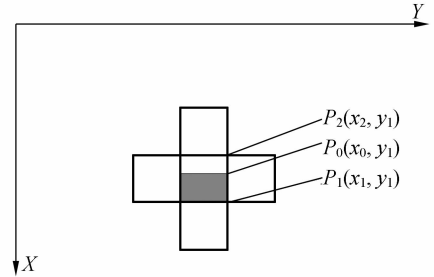


图 1 亚像素面积计算

Fig. 1 Sub-pixel area computation

4 实验

为了考察该方法的测量精度和多目标检测能力,本文设计了 3 组实验。第一组实验考察标准面积测量误差,第二组实验考察实际面积测量误差,第三组实验考察多目标面积测量能力。实验是在 Pentium 4 2.80 GHz (物理内存为 256M) 的平台上使用 Matlab 编写程序完成的。

4.1 实验 1

应用 ACDsee6.0 生成了两个标准的矩形(图 2,图像尺寸为 320 pixel \times 240 pixel),相应的两个矩形标准像素面积为 96 pixel \times 81 pixel, 37 pixel \times 97 pixel。相应的测试结果如表 1 和表 2 所示。主动轮廓线的迭代次数为 450 次。

在表 1、表 2 中,将 2σ 作为测量重复性误差(σ 为测量值标准差),因为在多次测量情况下测量误差基本服从高斯分布。同时,还将本文方法和文献^[9]中基于动态轮廓线的单目标面积测量方法做了对比。应用动态轮廓线分别对这两个矩形进行测量,其中大矩形的测量重复性误差 2σ 为

0.47%, 测量平均值误差为 0.27%; 小矩形的重复性误差 2σ 为 0.49%, 测量平均值误差为 0.34%。可以看出, 本文的短程线主动轮廓线模

型的亚像素面积测量法不仅能同时进行多目标的面积测量, 而且相应的测量误差小于文献[9]的相应误差。

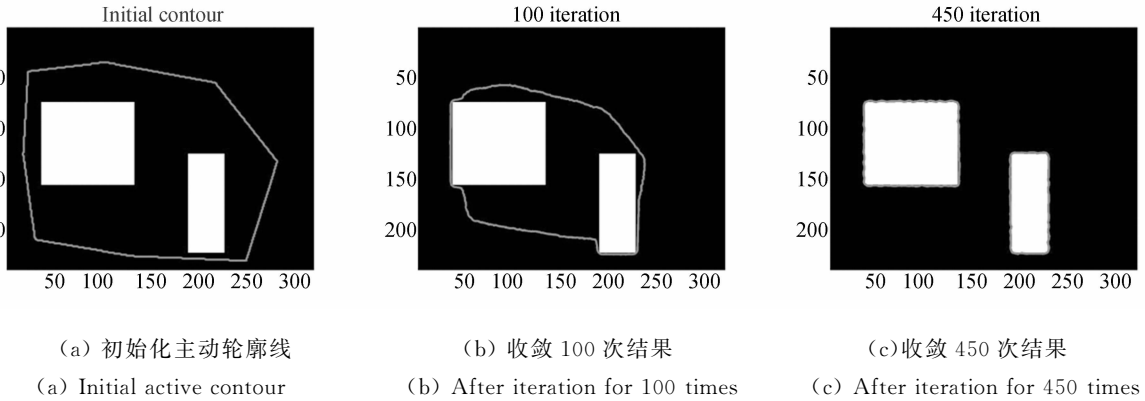


图 2 矩形面积测量

Fig. 2 Area measurement of rectangle

表 1 大矩形像素面积计算结果与误差

Tab.1 Computed results and errors of large rectangle pixel area

测量次数	像素面积/pixel ²	相对误差/%
1	7 773	-0.04
2	7 803	0.35
3	7 782	0.08
4	7 787	0.14
5	7 788	0.15
6	7 788	0.15
7	7 792	0.21
2σ	30.973	0.40
平均值	7 788	0.15

表 2 小矩形像素面积计算结果与误差

Tab.2 Computed results and errors of small rectangle pixel area

测量次数	像素面积/pixel ²	相对误差/%
1	3 600	0.31
2	3 600	0.31
3	3 585	-0.11
4	3 602	0.36
5	3 591	0.06
6	3 590	0.03
7	3 586	-0.08
2σ	17.146	0.48
平均值	3 593	0.11

4.2 实验 2

采集生物细胞的显微图像(图 3, 图像尺寸为 83 pixel×65 pixel), 应用本文的主动轮廓线方法

对图像中 2 个细胞像素面积进行了测量。相应测试结果如表 3 和表 4 所示。主动轮廓线的迭代次数为 300 次。

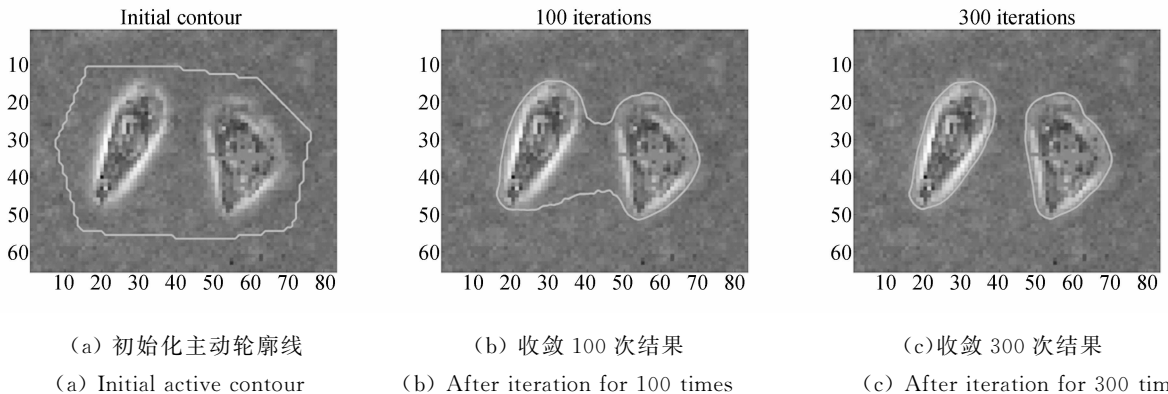


图 3 细胞面积测量

Fig. 3 Area measurement of cell

表 3 左侧细胞像素面积计算结果与误差

Tab. 3 Computed results and errors of pixel area for left cell

测量次数	像素面积/pixel ²	相对误差/%
1	454.1	0.00
2	454.3	0.05
3	452.6	-0.32
4	455.7	0.36
5	453.5	-0.13
6	454.2	0.03
7	454.1	0.00
2 σ	1.864 5	0.41
平均值	454.1	0.00

表 4 右侧细胞像素面积计算结果与误差

Tab. 4 Computed results and errors of pixel area for right cell

测量次数	像素面积/pixel ²	相对误差/%
1	483.2	0.00
2	483.0	-0.04
3	484.2	0.21
4	482.0	-0.25
5	483.7	0.10
6	481.8	-0.29
7	484.5	0.27
2 σ	2.062 4	0.43
平均值	483.2	0.00

4.3 实验 3

本组实验考察这种方法的多目标检测能力,使用了含有 10 架飞机模型的图像进行测试,如图 4 所示。相应的像素面积测量结果如表 5 所示,

可以看出这种方法确实能够同时检测多个图像目标并进行面积测量(表 5 中对飞机的编号是按照从左到右和从上到下的顺序进行的)。主动轮廓线的迭代次数为 850 次。

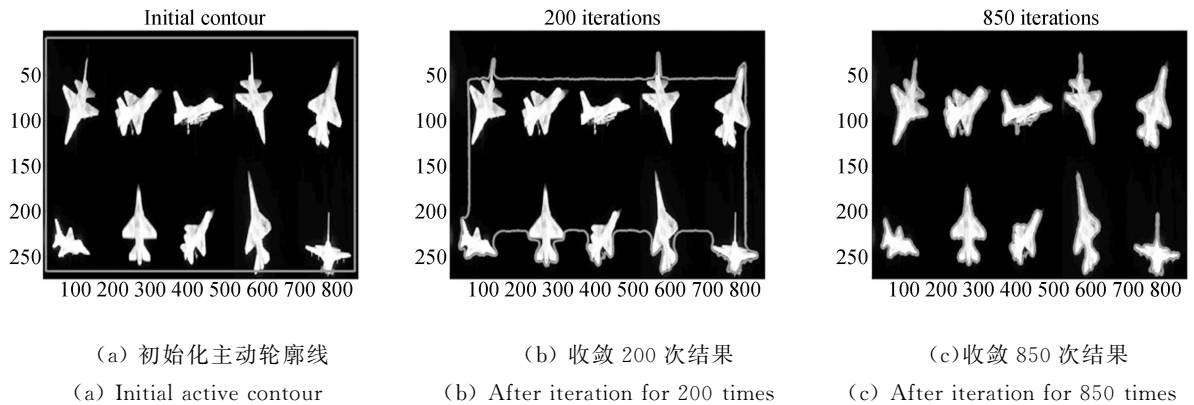


图 4 飞机面积测量

Fig. 4 Area measurement of aircraft

表 5 飞机模型像素面积测量

Tab. 5 Computed results of pixel areas for airplane model

飞机编号	像素面积/pixel ²
1	2 894
2	2 992
3	2 183
4	2 889
5	3 836
6	1 610
7	3 104
8	2 181
9	2 703
10	1 502

5 结 论

本文提出的这种多目标像素面积测量方法具有较高的测量精度,如果采用足够多的迭代次数,面积测量重复性误差可减小到 $\pm 0.5\%$ 。此外,该方法具有较好的鲁棒性,能够精确测量形状复杂的多目标(例如多架飞机模型)的像素面积。但是,该方法也具有一定的局限性,即图像目标较大时主动轮廓线的收敛时间较长,导致了测量速度较慢,这也是今后该项技术应解决的问题。

参考文献:

- [1] 吴晓波,安问斗,杨钢. 图像测量系统中的误差分析即提高测量精度的途径[J]. 光学精密工程,1997,5(1):133-141.
WU X B, AN W D, YANG G. Error analyzing and approaches of improving measuring precision in image measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 133-141. (in Chinese)
- [2] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. 光学精密工程,2006,14(3):468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, *et al.*. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3): 468-472. (in Chinese)
- [3] 叶东,徐巧玉,车仁生. 视觉测量系统的相机校准[J]. 光学精密工程,2006,14(5):883-890.
YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (5): 883-890. (in Chinese)
- [4] CHAUDHURI S, MUKHERJEE A, DUTTA P K, *et al.*. Automatic measurement of frontal area and volume of fluted ingots using image-based instrumentation [J]. *Measurement*, 2003, 33, 325-332.
- [5] 马宏伟. 成像无损检测中缺陷的分类与面积计算[J]. 仪器仪表学报,2001,22(增):212-213.
MA H W. Classification and area calculation of defects in image NDT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(Supp.): 212-213. (in Chinese)
- [6] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988,(1):321-331.
- [7] JONES T D, PLASSMANN P. An active contour model for measuring the area of leg ulcers [J]. *IEEE Trans. on Med. Imaging*, 2000, 19(12):1202-1210.
- [8] PLASSMANN P, JONES T D. Improved active contour models with application to measurement of leg ulcers [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2003, 12(2): 317-326.
- [9] 赵鹏,浦昭邦,张田文. 基于动态轮廓线的图像面积测量研究[J]. 仪器仪表学报,2006, 27(9):1150-1153.
ZHAO P, PU ZH B, ZHANG T W. Image area measurement based on a dynamic contour [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(9):1150-1153. (in Chinese)
- [10] SHEYNIN S, TUZIKOV A. Moment computation for objects with spline curve boundary [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2003, 25(10):1317-1322.
- [11] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G. Geodesic active contours [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997;22(1), 61-79.
- [12] MALLADI R, SETHIAN J A, VEMURI B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1995, 17(3):158-175.
- [13] LI C M, XU C Y, GUI C F, *et al.*. Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation [C]. *Proceedings of 2005 IEEE CVPR*, 2005, 1:430-436.

作者简介:赵鹏(1972—),男,黑龙江阿城人,副教授,研究方向为视觉检测、视觉跟踪、图像融合。E-mail: impanefu@yahoo.com.cn