

文章编号:1001-1595(2011)01-0066-05

## 目标轮廓直线特征的高精度提取

李彩林<sup>1</sup>, 郭宝云<sup>1</sup>, 李 畅<sup>2</sup>

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079

### The High-accurate Extraction of Line Features of Object Contour

LI Cailin<sup>1</sup>, GUO Baoyun<sup>1</sup>, LI Chang<sup>2</sup>

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract: A high-accurate extraction algorithm of line features of object contour is proposed in this paper, which combines the method of exact positioning of single point and the algorithm of line segment approximation with minimum-distance error. First object contour can be approximated exactly by linear feature. Then we search the adjacent line segment and compute the intersection point between them. At last, we realized the exact positioning of contour feature point and provided exact line segment data for 3D measuring and reconstruction based on contour. In contrast to other approaches (such as least squares template matching and parabola fitting methods), the algorithm proposed in this paper has not need good initial value of contour and can get better extraction result. An example is performed to verify the viewpoint.

Key words: contour feature extraction; line diffusion function; single-point position; chain code partition; precise position of line

**摘 要:**针对小型物体高精度量测的要求,提出一种结合精确单点定位方法和基于分裂的最小距离误差线段逼近法的高精度轮廓直线特征提取算法。通过利用直线特征精确逼近目标的轮廓,搜索相邻直线段并计算交点,从而实现轮廓分割点的精确定位,进而为基于轮廓的三维量测与重建提供高精度的直线特征数据。与其他方法(如最小二乘模板匹配、抛物线拟合等)相比,本文的算法对轮廓初始值的要求较低,同时能够获得更好的精度。

**关键词:**轮廓特征提取;线扩散函数;单点定位;链码分割;直线精确定位

**中图分类号:** P258

**文献标识码:** A

**基金项目:**国家自然科学基金(40771177, 41071233, 41071293)

近年来,基于目标特征的精确三维视觉测量已广泛应用于机械制造、医学、考古、工业测量以及微小目标的精确测量等领域<sup>[1-2]</sup>。目标特征的精确提取是从二维序列图像获取三维信息必不可少的步骤。由于小型物体精密重建与测量对精度有很高的要求,许多学者对高精度特征提取技术进行深入的研究<sup>[3-7]</sup>。文献[4]提出一种基于离散直线段的合并方法,该方法可以较好地保证局部边缘特性。文献[5]利用最小二乘模板匹配对目标进行精确定位。但是,这些方法都存在着一定的缺陷,例如基于离散直线段合并的方法很难保证全局最优的结果,而最小二乘模板匹配尽管可以进行子像素定位,但是对初始值的要求较高。

目前,基于影像目标轮廓直线特征的三维重建方面的研究日渐增多<sup>[7-8]</sup>,在某些领域已经显示出潜在的应用前景。由于轮廓提取的精度以及分割点的确定直接影响重建物体的图形形状和量测

精度,因此提取目标高精度轮廓线或闭合轮廓线尤为关键。

本文主要针对小型物体高精度量测的要求,提出结合精确单点定位和基于分裂的最小距离线段逼近法的高精度轮廓直线特征提取算法,使用直线特征精确逼近目标的轮廓,搜索相邻直线段并计算其交点,从而实现轮廓分割点的精确定位,为基于轮廓的三维量测与重建提供高精度的直线特征数据。试验表明该算法能够满足工业领域中高精度三维视觉测量的要求,同时由于在直线段逼近轮廓之前引入单点精确定位算法,因此对初始值的要求不高,有很强的适用性。

### 1 基于线扩散函数的精确单点定位

在基于轮廓线的小型物体三维重构中,轮廓线提取的精度以及分割点的确定直接影响重建物体的图形形状和量测精度。传统的轮廓直线特征

提取算法都是基于初始的边缘轮廓链码进行链码分割与直线段拟合,然后再对直线进行精确定位。该方法确定轮廓分割点的定位精度不高,不能满足某些领域应用的高精度要求。针对这个问题,本文引入基于线扩散函数模型的单点精确定位算法<sup>[9]</sup>,提高了轮廓链码分割点的定位精度。另外,该算法只需要在初始边缘点的法向上一维迭代搜索边缘梯度变化最大的点,因此该算法定位速度快,精度高。

### 1.1 线扩散函数模型

在影像中,理想的目标边缘的灰度曲线是刀刃曲线,其边缘法线方向位置与灰度的关系为

$$g(x) = \int_{-\infty}^x S(x) dx \quad (1)$$

式中, $S(x)$ 是系统的线扩散函数,理想的线扩散函数是服从高斯分布的

$$S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\rho} \exp\left(-\frac{x^2}{2\rho^2}\right) \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为灰度概率分布的标准差; $x$ 为曲线法线方向离开边缘点的距离。将式(2)代入式(1)并求法线方向的偏导数,得边缘灰度在法线方向的梯度变化函数

$$\nabla g(x) = \frac{d}{dx} \int_{-\infty}^x S(x) dx = S(x) \quad (3)$$

从上式可以看出,影像灰度梯度在目标边缘附近与离开边缘中心的距离  $x$  成反比,与决定刀刃曲线形状的参数  $\rho$  成正比。把目标边缘法向梯度看作边缘法线方向距离  $r$  与线扩散函数形状参数  $\rho$  的函数,同时考虑到理想的轮廓边界线,经过成像输出后,其边缘影像的梯度与系统的线扩散函数成正比,则式(3)可改写为

$$\nabla g(r, \rho, k) = k\rho^{-1} \exp\left(-\frac{(x-r)^2}{2\rho^2}\right) \quad (4)$$

对上式线性化,其误差方程为

$$v(r, \rho, k) = c_0 dr + c_1 d\rho + c_2 dk + c_3 \quad (5)$$

式中,常数项  $c_0, c_1, c_2, c_3$  通过求偏导数得到。用式(5)求解时,可设线扩散函数的初始值为

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= 0 \\ \rho_0 &= 2.0 \\ k_0 &= 2\max(\nabla g) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 1.2 精确单点定位算法

已知轮廓点  $P(x, y)$  以及对应法向量的情况下,精确单点定位算法如下:

(1) 以  $P(x, y)$  为原点,沿法线方向使用双线性内插法,采集上下 10 个像素宽的一维灰度序列

$\{G_i\}$ 。

(2) 将灰度序列  $\{G_i\}$  代入式(5)建立误差方程,通过最小二乘迭代计算未知数  $(r, \rho, k)$ 。

(3) 计算精确定位坐标

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + r \cos \alpha \\ y' &= y - r \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad 0 \leq \alpha < \pi/2 \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - r \cos \alpha \\ y' &= y + r \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad -\pi/2 < \alpha < 0 \quad (8)$$

式中, $(x, y)$ 是轮廓点  $P$  的初始坐标; $(x', y')$ 是  $P$  点精确定位后的坐标; $r$  是沿  $P$  点法向上的偏移量; $\alpha$  是  $P$  点法线方向与水平方向的夹角。

(4) 进入下一点的处理。

## 2 基于分裂的最小距离误差线段逼近轮廓

初始轮廓是通过跟踪目标边缘像素得到的,获得轮廓的直线段特征需要用多边形近似逼近轮廓,即对轮廓链码精确分割后进行直线拟合。针对这个问题,根据应用需要和精度要求,采用基于分裂的最小距离误差线段逼近法实现轮廓链码的任意精度分割。

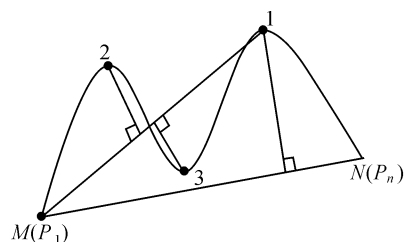


图 1 轮廓链码分割点的确定

Fig. 1 The definition of the cut point of contour chain code

如图 1 所示,已知链码  $MN$  由点序  $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n)$  组成,  $P_1, P_n$  分别对应链码的起点  $M$  和终点  $N$ 。具体的算法如下:

(1) 确定链码首尾两点  $M, N$  组成的直线方程

$$\frac{y - y_M}{x - x_M} = \frac{y_N - y_M}{x_N - x_M} \quad (9)$$

(2) 求  $MN$  上各点  $P_i$  到直线  $MN$  的距离  $d_i$ 。

(3) 求距离  $d_i$  中的最大值

$$d_{\max} = \max(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n) \quad (10)$$

(4) 比较  $d_{\max}$  与  $\epsilon$  的大小,并计算开关  $Q$

$$Q = \begin{cases} 1, & d_{\max} > \epsilon \\ 0, & d_{\max} \leq \epsilon \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\epsilon$  是根据精度要求确定的分割阈值。

(5) 链码分割点的确定: ① 如果  $Q=0$ , 则 MN 链码段不再继续分割, 转到下一步; ② 如果  $Q=1$ , 则将该距离最大点作为分割点并对其标记, 然后用该点代替 N, 转到第 1 步迭代循环确定每段链码上的分割点, 直到所有段链码不再分割为止。

(6) 对相邻分割点之间的像素点进行直线段拟合, 并计算拟合中误差, 剔除点到直线的距离大于 3 倍中误差的点, 重新进行直线段拟合。

### 3 高精度轮廓直线特征提取算法

高精度轮廓直线特征提取算法流程图如图 2 所示。

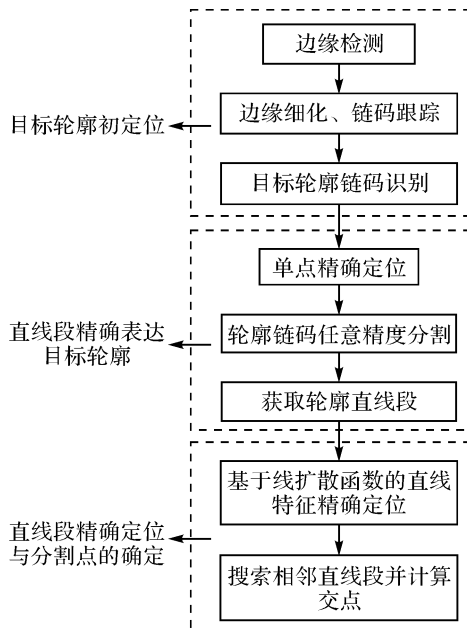


图 2 轮廓直线特征精确提取流程图

Fig. 2 The flow chart of accurate extraction of contour line feature

#### 3.1 目标轮廓线初定位

利用全局搜索法获取目标轮廓边缘初值, 其具体步骤如下:

(1) 首先对全局图像进行边缘检测, 视目标和背景的复杂度有以下两种情况: ① 若直方图有明显两个波峰时, 根据最大类间方差法自适应获取图像的分割阈值, 实现目标与背景的分, 同时获取目标的边缘; ② 若直方图有多个波峰与波谷时, 利用边缘检测算子, 得到图像的边缘图。

(2) 细化边缘二值图, 再进行链码跟踪。本

文提出可变窗口链码跟踪方法, 实现破碎边缘的自动连接, 避免以前算法对图像噪声敏感的缺陷。假设边缘点为 1, 非边缘点为 0, 可变窗口链码跟踪方法具体描述为: ① 对二值图像逐行搜索, 找到第一个边缘端点作为起始点, 并记录其坐标; ② 将此点的值置为 0, 以免重复跟踪; ③ 顺时针考察当前点的八邻域中是否有值为 1 的点, 若有则将该点置为当前点, 记录该点的坐标转到步骤②; ④ 若八邻域中点的值都为 0, 以当前点为中心, 将窗口扩大到  $5 \times 5$ , 在以当前点为中心的十六邻域中顺时针搜索, 如果有值为 1 的点将该点置为当前点, 记录该点的坐标转到步骤②, 如果值都为 0 转到步骤①; ⑤ 全幅图像搜索完毕, 跟踪结束。

(3) 根据具体的应用, 加入一定的先验知识 (如视长度最长的链码为目标轮廓) 进行全局搜索, 获取最终的目标轮廓边缘链码。

#### 3.2 直线段精确表达目标轮廓

##### 3.2.1 单点精确定位

由于小型物体的三维视觉量测与重建对精度和目标三维图形形状的要求很高, 然而基于序列影像目标轮廓直线特征的三维重建精度严重依赖于目标轮廓的提取精度, 其中多边形直线段逼近轮廓边缘链码的精度尤为关键, 它直接决定重建的精度以及目标三维图形形状的好坏。传统的轮廓直线特征提取算法都是对初始的目标轮廓边缘链码进行链码分割, 然后直线段拟合。由于初始轮廓边缘是整像素级的, 所以目标轮廓中较长的直线特征必定会造成链码分割点确定的多义性, 导致精度降低。因此在使用多边形直线段逼近轮廓边缘之前, 需要对轮廓点进行精确单点定位, 使得轮廓链码达到子像素的精度, 从而可以大大提高链码分割点的位置精度。

首先对 3.1 节中得到的目标轮廓边缘链码进行简化, 然后计算轮廓线上每个简化轮廓点的法向量。利用第 1 节中介绍的精确单点定位算法对每个简化轮廓点进行精确定位。

##### 3.2.2 直线段任意精度逼近轮廓链码

在单点定位的基础上, 采用改进的基于分裂的最小距离误差线段逼近法实现轮廓链码的任意精度分割, 然后对相邻两分割点之间的链码进行直线段拟合, 从而得到目标的初始轮廓直线段。具体实现过程见第 2 节。

#### 3.3 直线精确定位及分割点的确定

在得到初始轮廓直线段后, 利用基于线扩散

函数的高精度直线特征定位算法<sup>[10]</sup>对轮廓进行直线段精确定位,定位精度达到子像素级别。然后搜索相邻直线段并计算其交点,进而实现目标轮廓的高精度直线段逼近。

#### 4 试验结果与分析

为证实本文提出的轮廓提取算法的有效性和正确性,采用在背光方式下、旋转拍摄的钻石图像(图 3)进行轮廓直线段提取试验。硬件环境如图 4 所示,将钻石置于转台上,电机精确驱动转台,每间隔 1.8° CCD 相机采集一帧图像。图 5 是对钻石轮廓链码进行单点定位及分割点确定的局部放大结果。图 5(a)是经过图像阈值分割得到的目标初始边缘链码;图 5(b)为精确单点定位后得到的边缘链码;图 5(c)是初始边缘链码和精确单点定位后链码的叠加结果;利用基于分裂的最小距离误差线段逼近轮廓法对这两种链码进行分割,获取的轮廓分割点见图 5(d)。利用该算法对钻石图像轮廓精确提取的结果见图 6,其中红色直线是未经过精确单点定位的初始提取结果,绿色直线为经过精确单点定位的提取结果。

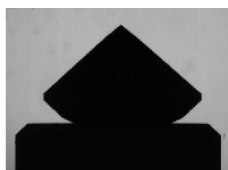


图 3 CCD 相机采集的钻石图像

Fig. 3 The image of diamond captured by CCD camera

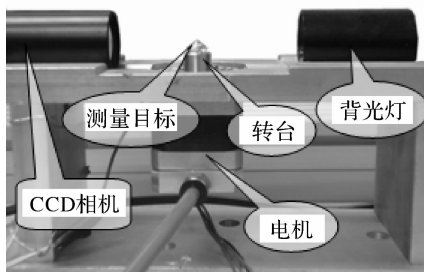


图 4 硬件装置

Fig. 4 The hardware device

本文算法已成功应用到钻石的三维视觉量测系统中,并使用已知加工数据的仿真钻石作为测量对象,经过 10 次测量,计算重构后钻石各类面的水平夹角和方位角的测量数据与对应的实际数据差值的中误差见表 1,钻石测量尺寸

数据与实际加工数据对比见表 2。基于该算法提取目标闭合轮廓,对钻石进行三维重建后的结果见图 7 所示。

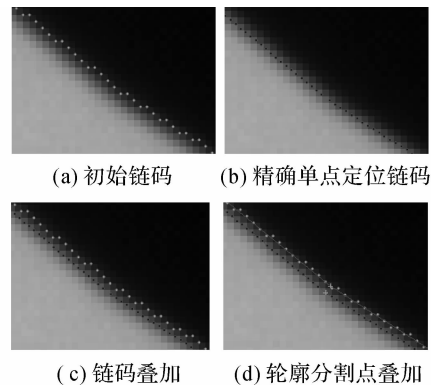
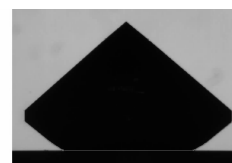
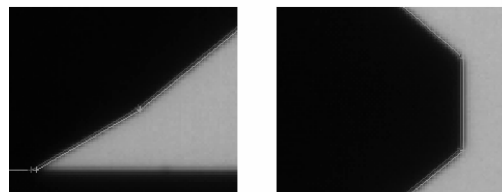


图 5 轮廓精确提取过程

Fig. 5 The accurate contour extraction process



(a) 钻石轮廓提取结果



(b) 局部放大结果

图 6 轮廓精确提取结果

Fig. 6 The accurate contour extraction result

表 1 钻石测量的面角度中误差

Tab. 1 The mean square error of surface angle in diamond measurement / (°)

统计项目	主冠面	主亭面	星刻面	上腰面	下腰面
水平夹角差值 中误差	0.056	0.043	0.093	0.222	0.077
方位角差值 中误差	0.578	0.763	1.028	0.544	0.542

表 2 钻石测量尺寸与实际尺寸数据比较

Tab. 2 The comparison between the size of measurement and the actual size of diamond

统计项目	平均直径/mm	平均腰厚/mm	台面大小/mm	钻高/mm	重量/ct
测量数据	1.983	0.135	1.256	1.272	0.034
实际数据	1.990	0.150	1.255	1.260	0.034 5
差值	-0.007	-0.015	0.013	0.012	0.000 5

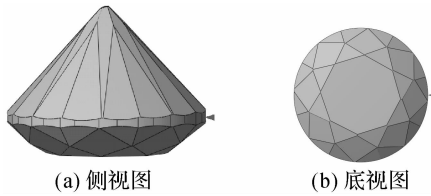


图7 钻石三维显示

Fig. 7 The 3D display of diamond

从表1和表2中可以看出,面的水平夹角中误差在 $0.2^\circ$ 以内,方位角中误差在 $1^\circ$ 左右,钻石尺寸精度在 $0.02\text{ mm}$ 以内,能够满足钻石检测的精度要求。

将本文算法与现有的常用算法进行十次测量结果进行比较,其比较结果见表3(注:表中第四列为表2中各项统计项目的绝对值的和的平均值)。

表3 与常用算法的测量结果比较

Tab. 3 The comparison of measuring result among a variety of algorithms

	平均水平 角差值中 误差/ $^\circ$	平均方位 角差值中 误差/ $^\circ$	平均测量 尺寸-实际 尺寸/mm
单点定位	0.098	0.691	0.0118
Sigmoid	0.113	0.932	0.078
抛物线拟合	0.104	0.865	0.035
最小二乘模板匹配	0.102	0.773	0.029

从比较的结果可以看出,本文提出的目标轮廓直线特征高精度提取算法要优于现有的常用算法。将本文算法应用在螺帽和工业零件的三维量测中,其精确提取结果分别见图8和图9。

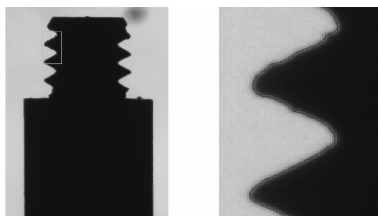


图8 螺帽轮廓直线特征提取

Fig. 8 The line feature extraction of nut



图9 工业零件的特征提取

Fig. 9 The feature extraction of the industrial sheetmetal part

## 5 结 论

本文针对背光方式采集的图像中目标与背景反差比较明显的特点,提出结合精确单点定位和基于分裂的最小距离误差线段逼近法的高精度轮廓直线特征提取算法。试验表明,该算法可以达到子像素的精度,同时由于在直线段逼近轮廓之前引入了单点精确定位算法,因此对初始值要求较低,能够满足小型物体的精细三维重建与测量的精度要求。

基于精确单点定位的方法对一般图像目标的阶跃边缘和刀刃边缘有着很好的适应性,但是对屋脊形边缘不适应,因此,未来的研究工作还需要进一步改进算法或者使用一种新的精确定位算法使得其适应屋脊形边缘目标轮廓的高精度提取。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. (张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社, 2008.)
- [2] FREMONT V, CHELLALI R. Turntable-based 3D Objects Reconstruction[C]// Proc. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore:IEEE, 2004.
- [3] FORSTNER W, GULCH E. A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features[C]// Inter-commission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data. Inter-laken:ISPRS, 1987.
- [4] SCHMID C, ZISSERMAN A. Automatic Line Matching Across Views[C]//Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Puerto Rico:IEEE, 1997:666-671.
- [5] GRUEN A. Adaptive Least Square Correlation: a Powerful Image Matching Technique[J]. South African Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1985, 14 (3): 175-187.
- [6] LOU Liantang. The Study of Object Contour Extraction Method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (娄联堂. 目标轮廓提取方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.)
- [7] WU Tao, LIU Jinyi. The Study of 3D Reconstruction Based on Contour [J]. The Journal of Fushun Petroleum Institute, 1999, 19(3):44-47. (吴涛, 刘金义. 基于轮廓线的三维重建方法的研究[J]. 抚顺石油学院学报, 1999, 19(3):44-47.)
- [8] ZHANG Taifa, ZHANG Hongyan, ZHANG Yajiang, et al. The Extraction Algorithm of Outer Boundary Contour Which Used for Surface Reconstruction [J]. Computer

(下转第83页)