

文章编号 1004-924X(2009)11-2842-07

工业 CT 图像圆精确测量

刘丰林, 乔桂锋, 邹 斌

(重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400030)

摘要: 为了自动检测工业 CT 图像中的圆并精确地测量其参数, 研究了基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法检测图像边缘, 利用圆存在的概率大小识别边缘图像中的圆并测量其参数的方法。首先, 利用 Facet 模型提取图像的亚像素边缘。接着, 研究了图像圆存在概率算法特点, 通过构造专用链表数据结构存储计算数据, 限制计算时圆心选取范围等方法, 克服了原计算方法效率低、占用内存大的缺点, 并运用改进的圆存在概率计算方法对工业 CT 图像中的圆进行自动检测。最后, 通过最小二乘法拟合圆边缘点, 计算圆参数的实际尺寸。使用空间分辨力为 2.0 lp/mm 的电子直线加速器工业 CT 系统, 扫描重建出包含 10 个圆的 800 pixel×800 pixel 工业 CT 图像, 运用该方法对图像中的圆进行了识别和测量。试验结果表明, 改进的圆存在概率算法计算效率明显提高, 图像中圆参数测量精度 < 0.5%, 满足工业 CT 图像圆自动测量的精确、快速、可靠等要求。

关键词: Facet 模型; 存在概率; 计算机层析成像; 图像测量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Precise measurement of circles in industrial computed tomographic images

LIU Feng-lin, QIAO Gui-feng, Zou Bin

(ICT Research Center, Key Laboratory of Opto-electronic Technology and System of the Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to detect circles automatically and to obtain the parameters in images precisely, a method to measure circles in industrial CT images was developed. Firstly, the sub-pixel edge of an image was detected based on a Facet model. Then, a method for calculating the existence probability map of circles and its defects were analyzed. To overcome the defects of long-time calculation and memory consumption, the present method made sure the potential range of the center of a circle and the stored message, which met the required numerical values in a chain. Finally, the circles were detected based on the improved method, and the circle parameters were calculated with Least Square Algorithm(LSA). The method was applied to measure an image with 10 circles obtained from an industrial CT system with the spatial resolution of 2.0 lp/mm. The results show that this method has greatly improved the calculation rate, and the measurement accuracy for circles is better than 0.5%. It can satisfy the measurement requirements of the circles for the higher speed, higher precision and non-contact.

Key words: Facet model; existence probability; computed tomography; image measurement

收稿日期: 2008-10-20; 修订日期: 2008-12-05.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA04Z104)

1 引 言

工业 CT (Industrial Computed Tomography, ICT)不但可用于探测物体内部构造,检测其内部缺陷,还可用于对物体内外表面进行精确测量。随着技术进步和发展,工业 CT 技术无损检测、反求设计与机械制造等领域得到广泛应用^[1-2]。在这些应用中,首先需要解决的是工业 CT 图像测量中的图像边缘提取问题,该环节误差将直接影响后续检测和模型的精度^[3-4]。将亚像素定位技术引入到工业 CT 图像测量,可用于解决图像中目标边缘的高精度定位问题,提高图像测量精度。另外,圆形结构在工业 CT 检测对象中大量存在,快速有效地检测出工业 CT 图像中的圆,并获得其参数,对工业 CT 技术在逆向工程中应用具有重要的意义。

常见的亚像素级边缘检测算法主要包括基于矩^[5]、基于插值^[6]和基于最小平方误差的算法。基于矩和基于插值的方法计算效率高,但对含噪图像的处理效果不好。基于最小平方误差的检测器^[7]通过在最小平方意义下拟合边缘参数模型来获得亚像素级的边缘位置,一般能有效地抑制噪声,但计算量较大。Haralick^[8]等提出的基于 Facet 模型的亚像素级边缘检测算法,通过三次多项式拟合 Facet 模型,再根据方向导数信息求得二阶过零点来确定亚像素边缘位置。该方法稳定可靠,能定位图像微小细节,提高检测精度,近年来在计算机视觉测量领域应用研究较多。

常见的图像圆检测方法有:基于霍夫变换(Hough Transform)的方法^[9]和基于模式识别的方法等。传统的 Hough 变换存在几个明显的缺点:计算量大、占用内存大以及要提取的参数受参数空间量化间隔的限制,因此在实际应用中直接运用霍夫变换的方法比较少。曲线拟合的方法需要预先确定拟合区间,而且对图像边缘提取的精度要求比较高,在圆边缘模糊时容易导致较大的误差。李伟青等^[10]提出一种基于模式识别的圆的识别算法,首先将图段与圆进行模式匹配,从而确定圆的种子图段,然后通过对其他图段实施跟踪,最终获得圆和圆弧的图形表示。该方法适应性强,但是识别一些短小的圆弧段时会遇到困难。张运楚等^[11]提出的一种基于存在概率的圆检测

算法,将图像边缘点共圆结构信息变换为圆存在概率图中的峰值,再通过检测峰值确定圆的参数。该方法能有效地检测出图像中不清晰、不完整的圆形轮廓,但其圆心的选择是针对图像中的每一个点,大量不可能为圆心的点也被考虑在内,计算量大。根据灰度图像的矩理论对圆的测量^[12-13]是利用圆心与重心重合的特点,对采集得到的图像进行二值化,计算其矩,获得圆心坐标,再求出边缘点到圆心的距离得到圆的半径,测量相对精度达到 1%^[13]。

本文针对工业 CT 图像精密测量需求,研究了基于 Facet 模型亚像素边缘检测和存在概率的圆检测算法,用于自动识别和精确测量工业 CT 图像中圆参数。研究重点是改进现有圆存在概率算法,提高计算效率和圆参数测量精度。

2 基于 Facet 模型的亚像素边缘检测

一幅图像的连续灰度分布函数可由像素行和列坐标的高次或超越函数组成,要想恢复出原始连续函数基本上是不可能的,但是可以采用较为简单的分段函数来建立图像的模型。对于图像的每一个像素,都可以找到一个可以逼近该像素及其邻域像素灰度值的函数,每个函数仅对图像中某个特定像素有效,一幅图像可由若干个连接着的区域来近似,这种逼近方法叫做小面模型(Facet Model)^[14]。

根据微分几何中有关曲面的理论,特征点是在边缘线上具有最大切线斜率变化的点。假定图像的某一小局部区域灰度分布用具有三阶偏导数的曲面来表示,在某像素为中心的一个小邻域内用一个在行和列坐标系中正交的离散多项式作曲面拟合,求得灰度分布曲面方程的参数估计,对拟合曲面求切线斜率变化最大的极值点,该极值点位置即为待检测的特征边缘点。

基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法通过计算 Facet 模型沿灰度梯度方向上的二阶方向导数过零点获得边缘点的准确位置。假设图像上任一像素 (x, y) 的 5×5 区域 3 阶 Facet 模型可表示为

$$f(r, c) = k_1 + k_2 r + k_3 c + k_4 r^2 + k_5 r c + k_6 c^2 + k_7 r^3 + k_8 r^2 c + k_9 r c^2 + k_{10} c^3, \quad (1)$$

$$r, c \in [-2, -1, 0, 1, 2],$$

式中, (r, c) 为该局部邻域内任意点的坐标; $k_1 \sim k_{10}$ 为系数, 可通过最小二乘拟合获得^[14]。则

$$\sin \alpha = \frac{k_2}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}, \quad \cos \alpha = \frac{k_3}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}},$$

定义 $r = \rho \sin \alpha, c = \rho \cos \alpha$, 按照上面所得系数表达的模型, 在 α 方向的一阶、二阶、三阶偏导数分别为

$$\begin{cases} f'(\rho) = m_1 + 2m_2\rho + 3m_3\rho^2 \\ f''(\rho) = 2m_2 + 6m_3\rho \\ f'''(\rho) = 6m_3 \end{cases}, \quad (2)$$

边缘点出现在局部图像拟合曲面的一阶导数局部极值位置, 该位置对应着二阶导数的零交叉点。如果取得 ρ_0 (ρ_0 在以 (r, c) 为中心的 5×5 子区域内), 使得

$$f''(\rho) = 2m_2 + 6m_3\rho = 0 \Rightarrow \left| \frac{m_2}{3m_3} \right| < \rho_0, \quad (3)$$

且三阶偏导小于零

$$f'''(\rho) < 0 \Rightarrow m_3 < 0, \quad (4)$$

则 (r, c) 判断为边缘点。

基于 Facet 模型的图像边缘检测精度高, 且对图像噪声有一定抑制作用。

3 基于存在概率的圆检测改进算法

3.1 图像圆存在概率

数学上任何一个圆均可由圆心 (x_0, y_0) 和半径 r 惟一表示为:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2. \quad (5)$$

为了获得工业 CT 图像中圆的位置和大小, 利用基于存在概率的圆检测方法确定圆的圆心和半径。存在概率 (Probability of Existence) P_e , 表示存在以点 $P(u, v)$ 为圆心, r 为半径的圆的可能性大小, 其计算公式为:

$$P_e = \frac{A(r)}{2\pi r}. \quad (6)$$

需要说明的是数字图像中圆周边缘是离散化的, 式(6)中 $A(r)$ 表示图像边缘曲线上到圆心距离为 r 的边缘点的个数, $2\pi r$ 表示数字图像中半径为 r 的圆离散化表示后像素点的个数。

将图像中的每一个像素 (x, y) 对应的圆存在概率 P_e 保存在二维数组 $\{P(x, y)\}$ 的 $P(x, y)$ 单元中, 从而生成圆存在概率图, 半径 R_m 则保存在二维数组 $\{R(x, y)\}$ 所对应的单元中。存在概率

图 $\{P(x, y)\}$ 中的每一个峰值代表原图像中存在一个以峰值坐标 (x_p, y_p) 为圆心, 半径为 $R(x_p, y_p)$ 的圆, $P(x_p, y_p)$ 则给出了这一假设的可能性大小。

图 1 为一幅包含 1 个圆弧特征的工业 CT 图像, 图中用虚线表示出了图像中圆弧特征的位置。计算圆心点的存在概率值, 生成的存在概率图如图 2 所示。提取存在概率图中的峰值, 得到图像中圆的信息: 圆心坐标为 $(256, 255)$, 半径为 47.518 4, 圆存在概率为 0.904 317。图 1 中虚线标出了检测到的圆的位置。

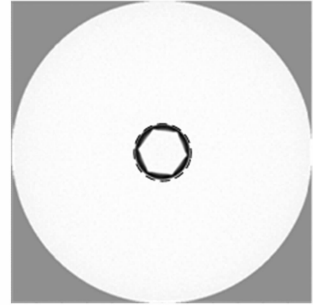


图 1 含有 1 个圆弧特征的工业 CT 图像
Fig. 1 Industrial CT image with 1 circle feature

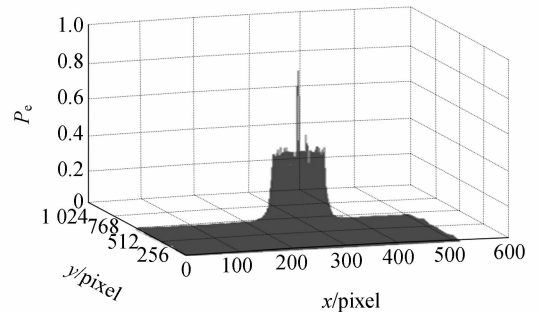


图 2 圆存在概率图
Fig. 2 Existence probability map of circles

3.2 改进的圆存在概率算法

上述基于存在概率的圆检测方法对于潜在圆心点的选取是在整个图像中进行的, 而图像中绝大部分点是不可能为圆心的, 圆心点只可能存在于图像中目标区域的一小范围内。因此, 对于待检圆的圆心选取范围作了改进。根据得到的图像连续闭合边缘, 计算此闭合轮廓的形心, 将圆心的选择范围缩小到以形心为中心, 适当长度为边长的正方形范围之内。

3.2.1 圆心选取范围改进

根据构成圆的必要条件:如果一条闭合曲线构成圆,则圆上任意一点到圆上其他点的距离最大值的点为直径,直径的中点为圆心。图 3 给出了圆心范围选取示意图,对于每一条封闭轮廓,先找到轮廓的最下方的点 A 作为起点,再依次计算此轮廓中的点与起点的距离,取距离值最大的点 B 作为终点,设起点与终点间距离为 D ,将起点与终点连线的中点 O 近似看作此封闭轮廓的形心,以此形心点为中心, $D \times \omega$ ($0 < \omega < 1$) 为边长构成的正方形区域作为圆心的待选区域 C (此处取 $D = 100, \omega = 0.1$)。这样就大大减少了圆心点的数量,从而也减少了计算边缘点到圆心点的距离的次数。

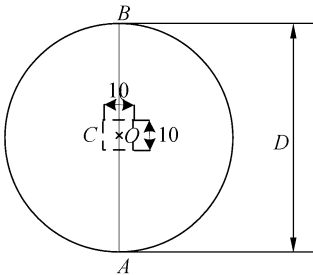


图 3 圆心范围选取示意图

Fig. 3 Range of circle center

3.2.2 圆参数存储方式改进

基于存在概率图的圆检测算法记录圆存在概率图时,存储圆心点的坐标、半径以及存在概率等数据时使用的是二维数组,这种方法需要事先分配内存,对于不同大小的图像定义的二维数组的大小不同,事先分配的内存也就不同。如果定义数组过大,则势必造成内存空间的浪费,过小则可能造成数据溢出。本文利用链表来存储上述参数。链表存储是动态分配内存的形式,不用事先定义内存大小,而且对于不同大小的图像也不必像数组存储那样更改数组的大小。

本文构造的链表的数据结构为:

typedef struct

```
{
    int x;           //圆心 x 坐标
    int y;           //圆心 y 坐标
} Point;
```

struct NODE

```
{
    Point point;    //圆心坐标
    float r;        //圆半径
    int k;          //对应边缘点的个数
    float p;        //圆存在概率
    NODE * next;   //指向下一结点的指针
};
```

4 图像中圆参数测量

原始的工业 CT 图像经图像降噪,图像增强等预处理后,用基于 Facet 模型提取图像亚像素边缘,并填补边缘间断点,得到闭合轮廓曲线。改进的算法首先确定每条闭合轮廓的圆心选取范围,计算每一条边缘点与对应圆心的距离,将结点参数(圆心坐标,半径,边缘点个数,圆存在概率)插入链表 1,将符合条件的 P 。插入链表 2,遍历链表 2,按 P 。从大到小计算所有圆的参数信息。图 4 为算法具体实现流程图。最后将求得圆参数的像素尺寸与单个像素代表的实际大小相乘,得到圆参数的最终测量结果。

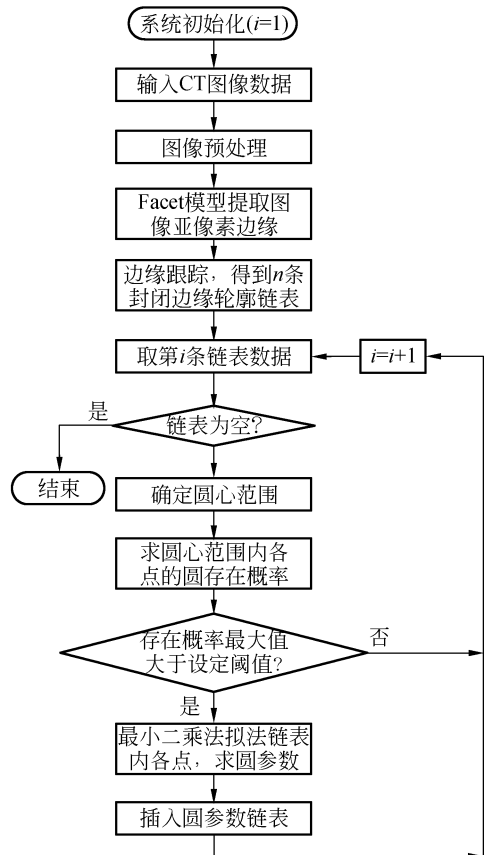


图 4 圆检测和测量流程图

Fig. 4 Flowchart of circle measurement

根据多次实测确定圆存在概率值在(0.7~1)范围内时判定闭合曲线为圆效果较好。对于存在概率在此范围内的轮廓,判断轮廓中心点到轮廓曲线上的点的距离与拟合得到的半径值的差值是否在允许误差范围内,若不在误差范围内则不能将其拟合为圆,防止将近圆形轮廓错误地识别为圆。

5 试验结果及分析

5.1 试验条件

图 5 为一幅包含 10 个圆弧特征的工业 CT 图像,使用重庆大学 ICT 研究中心的 CD-650BX 工业 CT 系统扫描重建。工业 CT 系统技术指标包括:射线源为 6/9 MeV 电子直线加速器,系统空间分辨力 2.0 lp/mm,密度分辨力优于 0.5%。扫描视场直径为 398.872 mm,图像矩阵为 800 pixel×800 pixel。

图 6 为使用 5×5 区域 3 阶 Facet 模型提取的亚像素图像边缘,图 7 为图像圆存在概率图。图像中的 10 个圆分别用数字 1 到 10 标记。

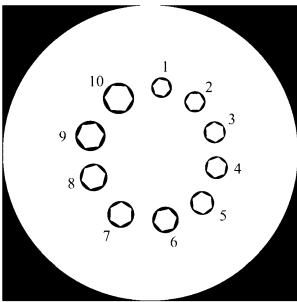


图 5 含有 10 个圆弧特征的工业 CT 图像

Fig. 5 Industrial CT image with 10 circle features

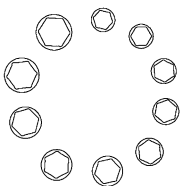


图 6 基于 Facet 模型的亚像素图像边缘图

Fig. 6 Sub-pixel edges based on Facet model

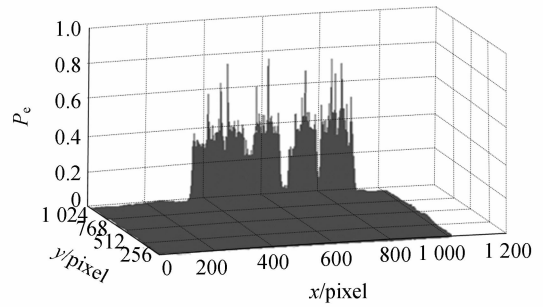


图 7 圆存在概率图

Fig. 7 Existence probability map of circles

5.2 改进圆存在概率检测算法计算效率试验

根据文献[11],设图像大小为 $M \times N$,边缘点数量为 P ,计算一次两点间欧式距离所用的时间为 T_{ed} ,求取定长一维数组最大值所用的时间为 T_m 。对于图像中每一像素,算法要进行 P 次欧式距离计算和一次求数组最大值计算。因此,生成圆存在概率图所用的总时间为:

$$T_1 = M \times N \times (P \times T_{ed} + T_m). \quad (7)$$

本文所述方法所用时间:设图像大小为 $M \times N$,图像中闭合轮廓线为 n 条,平均每一条闭合轮廓的圆心范围大小为 $k \times k$ 大小的正方形区域,边缘点数量为 P ,计算一次两点间欧式距离所用的时间为 T_{ed} ,求取一条链中最大值所用时间为 T_m ,则本文算法生成圆存在概率链表所用的总时间为:

$$T_2 = n \times k \times k \times (P \times T_{ed} + T_m). \quad (8)$$

对图 5 进行圆存在概率图对比计算,图像中圆数量为 10。使用计算机配置为 AMD 64 Processor 1.81 GHz CPU、512 MB 内存,用 VC++ 编程,原算法计算时间为 1 018.094 s,使用改进后算法其计算时间为 5.718 s。实际计算时间和 CT 图像矩阵大小、图像中圆的数量,使用计算机配置等有关。从试验结果可以看出,改进后算法的计算效率显著提高。

5.3 图像圆参数测量结果

表 1 列出了包含 10 个圆弧特征工业 CT 图像中圆的参数测量结果,表 2 为测量值与真实值之间的绝对、相对误差。

表 1 工业 CT 图像中的圆参数测量结果

Tab.1 Measurement results of circle parameters

圆序号	存在概率	圆心坐标	半径测量值	半径测量值
		/pixel	/pixel	mm
1	0.799	(429,576)	28.057	13.989
2	0.816	(520,537)	28.677	14.298
3	0.903	(573,455)	29.757	14.837
4	0.820	(578,360)	30.923	15.418
5	0.887	(540,264)	32.349	16.129
6	0.775	(440,219)	35.868	17.884
7	0.850	(320,233)	36.445	18.171
8	0.846	(246,333)	37.393	18.644
9	0.748	(237,445)	41.106	20.495
10	0.877	(314,547)	42.362	21.125

表 2 测量误差

Tab.2 Measurement errors

圆序号	真实值	测量值	绝对误差	相对误差
	mm	mm	mm	%
1	13.925	13.989	0.064	0.460
2	14.240	14.298	0.058	0.407
3	14.780	14.837	0.057	0.386
4	15.350	15.418	0.068	0.443
5	16.075	16.129	0.054	0.336
6	17.810	17.884	0.074	0.140
7	18.125	18.171	0.046	0.415
8	18.590	18.644	0.054	0.290
9	20.420	20.495	0.075	0.367
10	21.030	21.125	0.095	0.452

参考文献:

- [1] 李礼夫,刘丰林. 聚合物成型形态的计算机层析图像测量法研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(3): 111-114.
LI L F, LIU F L. Image measurement of computed tomography for processing polymer configuration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 111-114. (in Chinese)
- [2] 孙进,李耀明. 逆向工程的关键技术及其研究[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(1):5-7.
SUN J, LI Y M. Development in key technologies of reverse engineering[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, 43(1):5-7. (in Chinese)
- [3] 王凯,张定华,赵歆波,等. 一种改进的基于 Facet 模

由表 2 可以看出,测量值比真实值偏大,半径测量值的绝对误差 < 0.10 mm,相对误差 $< 0.5\%$,测量精度优于基于矩的图像圆测量^[13]。

6 结 论

本文叙述的利用基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法检测图像边缘,通过计算圆存在的概率大小识别边缘图像中的圆,能够有效检测出工业 CT 图像中的圆,并实现圆参数的精确测量;通过构造专用链表数据结构存储计算数据和限制计算时圆心选取范围的方法,可以明显地提高计算效率、减小内存使用量。运用研究的方法对一幅包含十个圆的工业 CT 图像进行基于 Facet 模型的亚像素边缘检测和基于存在概率的圆检测,利用最小二乘拟合圆边缘点计算圆半径,结果表明其测量相对误差 $< 0.5\%$,基本满足了工业 CT 图像圆参数自动精确测量的要求。

本文进行试验研究对象材质相同,对由不同密度的材质构成的检测对象,其工业 CT 图像灰度等级差别较大,后续研究还需进一步研究对不同密度材料工业 CT 图像的圆精确测量。

型的亚像素表面检测算法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(3):343-347.

WANG K, ZHANG D H, ZH Y B, *et al.*. An improved subpixel surface detection algorithm based on facet model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(3):343-347. (in Chinese)

[4] 张舞杰,杨义禄,李迪,等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2):294-301.
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 294-301. (in Chinese)

[5] SHAN Y, BOON G W. Sub-pixel location of edges with non-uniform blurring: a finite closed-form approach[J]. *Image and Vision Computing*, 2000, 18(13):1015-1023.

- [6] STEGER C. Subpixel-precise extraction of lines and edges[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000,33(3):141-156.
- [7] KISWORO M, VENKATESH S, WEST G. Modeling edges at subpixel accuracy using the local energy approach[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994,16(4):405-410.
- [8] HARALICK R M. Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984,6(1):58-68.
- [9] 崔继文, 谭久彬. 基于约束抽样 Hough 变换的圆轮廓快速检测技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(10):1394-1396.
CUI J W, TAN J B. Fast circle contour detection technique based on hough transformation with sampling restraint[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(10):1394-1396. (in Chinese)
- [10] 李伟青, 彭群生. 一种基于模式的圆的识别算法[J]. 软件学报, 1999, 10(2):129-132.
LI W Q, PENG Q SH. A pattern based circular arc recognition algorithm[J]. *Journal of Software*, 1999, 10(2):129-132. (in Chinese)
- [11] 张运楚, 王宏明, 梁自泽, 等. 基于存在概率图的圆检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 29:49-51.
ZHANG Y CH, WANG H M, LIANG Z Z, *et al.*. Existence probability map based circle detection method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 29:49-51.
- [12] 敖磊, 谭久彬, 崔继文, 等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):668-673.
AO L, TAN J B, CUI J W, *et al.*. Precise center location algorithm for circle target in CCD laser dual axis autocollimator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):668-673. (in Chinese)
- [13] 邓进军, 苑伟政, 李晓莹, 等. 微机械器件形状与尺寸的图像测量研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(增):101-103, 107.
DENG J J, YUAN W ZH, LI X Y, *et al.*. Image measurement of micro-machined device's dimension and shape[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(Supp.):101-103, 107. (in Chinese)
- [14] 田军委, 舒远, 田东平, 等. 视觉测量中亚像元图像特征定位算法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11):75-80.
TIAN J W, SHU Y, TIAN D P, *et al.*. Image sub-pixel feature location algorithm on measurement system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11):75-80. (in Chinese)

作者简介:



刘丰林(1969—), 男, 河南镇平人, 副研究员, 硕士, 1990年, 1993年于重庆大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事工业 CT 技术与系统、机械电子技术等方面的研究。E-mail: ict_lfl@yahoo.com.cn



乔桂锋(1983—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: qiaoguifeng@163.com



邹 斌(1984—), 男, 江西安福人, 硕士研究生, 主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: puma1984@163.com