

文章编号:1000-582X(2008)08-0836-06

# 存在概率的工业 CT 图像快速圆测量

刘丰林, 乔桂锋

(重庆大学 ICT 研究中心, 重庆 400030)

**摘要:**针对逆向工程中一般测量方法无法实现对封闭工件内腔进行测量,以及采用铣削层切法等传统测量法测量工件内腔具有破坏性等缺点,通过计算机层析成像测量法实现对工件的精确测量。对获得的工件 CT 图像,利用图像测量法测得工件内腔尺寸,并在 CAD 软件中进行编辑、完善并标注尺寸。首先利用基于存在概率的方法确定图像中圆的位置,并获得其像素尺寸,然后根据图像大小与视场直径得到像素的实际大小,二者的乘积即为圆的实际大小。对一具体工件进行测量,试验结果表明利用此方法测得的圆半径与实际尺寸的相对误差小于 0.5%,测量时间在几秒之内。

**关键词:**逆向工程;无损检测;存在概率;计算机层析成像;图像测量

**中图分类号:**TG806

**文献标志码:**A

## Fast circle measurement of industrial CT images based on existence probability

LIU Feng-lin, QIAO Gui-feng

(ICT Research Center, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The general methods in reverse engineering cannot measure the inside of close parts. Traditional methods like Capture Geometrical Inside (CGI) would destroy the part. We used the industrial computer tomography (ICT) method to obtain accurate measurements of close parts. Based on the acquired computer tomography images, the size of an internal part was obtained through image measurement and subsequently edited, amended, and dimensioned in CAD software. First, the position and the pixel size of the circle were determined based on existence probability. Next, the actual size of one pixel was obtained based on the image size and the purview diameter. Finally, the actual circle size was calculated by multiplying the pixel size and the actual size of one pixel. A real part was measured using the method. The results show that the relative error of the measured circle radius and the actual size is less than 0.5% and the measuring time is several seconds.

**Key words:** reverse engineering; non-destructive testing; existence probability; computer tomography; image measurement

逆向工程是先进制造技术的一个重要部分,在产品开发及制造过程中具有重要的作用。逆向工程

技术不仅提供了一种新产品设计的新方法,而且可以大大缩短产品设计时间,加速新产品上市的速度

收稿日期:2008-03-28

基金项目:国家“863”高科技资助项目(2006AA04Z104)

作者简介:刘丰林(1969-),男,重庆大学副研究员,博士研究生,主要从事工业 CT 技术与系统方向的研究,

(Tel)13983075766;(E-mail)ict\_lfl@yahoo.com.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

度<sup>[1-3]</sup>。目前,逆向工程中对工件外形及开敞部位的精确测量技术已比较成熟,但是对工件封闭内腔的测量,传统方法是采用铣削层切法,具有破坏性,无法实现工件的无损检测。

逆向工程中常用的测量方法有:三坐标机测量法、铣削层切法、超声波测量法、面阵 CCD 摄像机测量法、CT 测量法等。三坐标机测量法具有噪声低、精度高和重复性好等优点<sup>[4-6]</sup>,但是,它是点接触,体积大,结构复杂,对测量条件要求苛刻,且只能对工件开敞部位及表面进行测量,不适用于有空腔等内部结构的工件和产品的测量<sup>[7]</sup>。铣削层切法能够对具有复杂内腔和外形的物体进行测量,但是它具有破坏性,这是它的主要缺点。超声检测技术具有被检测对象范围广,检测深度大,缺陷定位准确,检测灵敏度高等特点<sup>[8]</sup>,但测量速度较慢,且测量精度不稳定。面阵 CCD 摄像机测量法<sup>[9-11]</sup>通过 CCD 摄像机摄取物体图像,经图像采集卡进行数据采集和处理后由图像采集程序将其转化为位图文件,后经图像处理获得测量数据<sup>[12]</sup>。工业 CT (industrial computer tomography, ICT) 技术是一种先进的无损检测技术,被国际无损检测界誉为最佳的无损检测手段,不但可探测物体内部构造、鉴别其内部缺陷,还可对物体内外表面进行精确测量,尤其在复杂零件内腔的无损检测中,工业 CT 技术起着无可替代的作用,而且对于解决处于高压、中温和密闭挤出加工环境中聚合物形态的非接触式、在线和无损测量的难题具有重要的意义<sup>[13]</sup>。面阵 CCD 测量法和工业 CT 测量法都属于图像测量法,但是前者只能对物体表面进行测量,对于封闭零件内腔测量无能为力,而后者适用于物体表面及内部尺寸的测量,且不受材质的限制。近年来,工业 CT 的应用已由定性检测向工件的定量测量方向发展,CT 测量技术在逆向工程中具有重要的实用意义。

快速而准确的获得工件的尺寸,重建工件的 CAD 模型在逆向工程中是必需的,利用基于存在概率的方法检测工业 CT 图像中的圆,对其进行测量,并在 CAD 软件中标注尺寸,进行编辑与完善。

## 1 数学模型

### 1.1 数学模型及原理

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

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2. \quad (1)$$

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<sup>[14]</sup>确定圆的圆心和

半径。

定义存在概率 $P_e$  (probability of existence), 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

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

需要说明的是数字图像中圆周边缘是离散化的,式(2)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 $r$ 的圆离散化后像素点的个数。这里,图像中的基本单位为像素点。

基于存在概率的圆检测方法基本思路为:将图像边缘点的共圆结构信息转换为圆存在概率值,如果存在概率值大于设定的阈值,则将其及与其对应的圆的圆心坐标和半径储存在链表中,待所有点的存在概率值计算完后,从链表中按由大到小选出 $m$ 个数据( $m$ 为图像中圆的个数),得到原图中圆的参数。该方法需要构造 2 个储存圆参数的链表 chain1 和 chain2,初始状态 chain1 和 chain2 为空,其数据结构为

```
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
};
```

为了叙述方便,下面给出出现的变量在图像中的位置关系。

图 1 为一幅套筒扳手零件的工业 CT 图像,图像中标示出了图像中的点与图像边缘上的点的关系。

如图 1 所示, $P_1(u, v)$ 为图像 $I$ 中的任意一点, $f_e(x, y)$ 表示图像边缘, $E = \{(x_i, y_i)\}$ 表示 $f_e(x, y)$ 中所有边缘点的集合, $P_2(x_i, y_i)$ 为 $E$ 中任意一点。设定最大和最小半径阈值 $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ ,被测圆的个数 $m$ ,边缘轮廓条数 $n$ 。在图 1 中,边缘轮廓条数为 2,待检圆个数为 1。

### 1.2 确定圆心范围

为了确定图像中的圆的位置,首先要确定图像

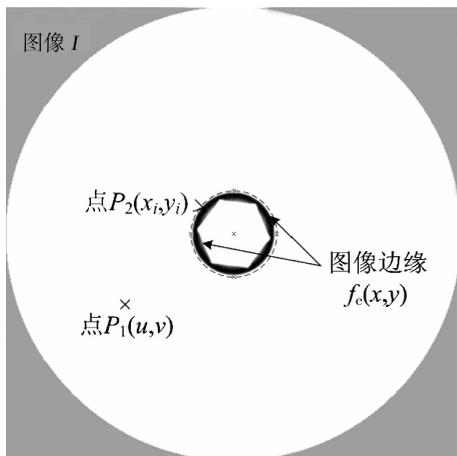


图 1 变量在图像中的位置示意图

边缘曲线内可能为圆心的点,这样可以大大降低计算量,提高计算效率。图像中的大部分点不可能为圆心,如边缘曲线外面的点一定不可能为此曲线的圆心,为了减少计算时间,提高计算效率,应该避免将不可能为圆心的点计算在内,缩小圆心的选取范围。根据构成圆的必要条件:如果一个曲线构成圆,则曲线上两点间距离最大的点构成的线段即为直径,其中点为圆心,由此可以近似计算出闭合边缘曲线的中心点。

原始工业 CT 图像经过图像预处理,提取图像边缘等操作后,利用 Freeman 链码<sup>[15]</sup>跟踪图像边缘,得到  $n$  条连续的封闭轮廓。图 2 给出了圆心范围选取示意图。

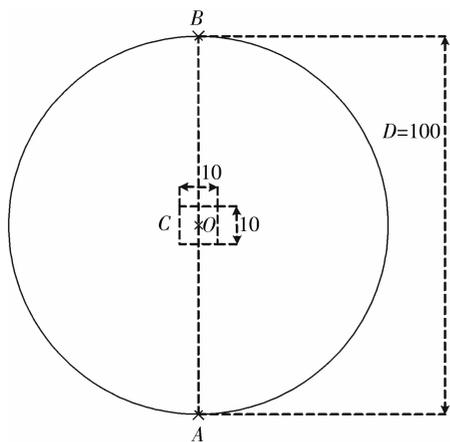


图 2 圆心范围选取示意图

如图 2 所示,对于一条封闭轮廓曲线,先找到曲线的最左下方的点 A,将其作为起点,再依次计算此曲线上的点与起点 A 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 A 与

终点 B 连线的中点近似看作此封闭曲线的形心,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需要计算存在概率的点的区域 C (此处取  $D=100, \omega=0.1$ )。

### 1.3 基于存在概率的圆检测方法原理

利用上述确定圆心范围的方法确定每一条边缘曲线的圆心选择范围,一条边缘曲线对应一个圆心范围 C,依次计算图像中的每一条边缘曲线对应的圆心范围 C 内部的点的存在概率。下面给出具体说明。

对于每一条边缘曲线,分别以与其对应的圆心范围 C 内的每一个点为圆心,计算此曲线上的每个边缘点到该圆心的欧式距离  $r_i$ ,计算公式为

$$r_i = \sqrt{(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2}. \quad (3)$$

如果  $r_i$  满足:  $R_{\min} \leq r_i \leq R_{\max}$ , 遍历 chain1, 查找结点的  $r$  域,若找不到与  $r_i$  相接近(其差的绝对值小于规定的阈值)的半径值,则生成一个新结点,其  $r$  域中的值设为  $r_i$ ,  $k$  域中的值设为 1,将此结点插入链表;否则,将与  $r_i$  值相对应的结点  $k$  域中的值加 1。当计算完边缘曲线上所有的点到圆心的距离后,遍历 chain1,寻找  $k$  域中值最大的结点,并将其  $k$  域中的值赋给  $A(r)$ ,利用公式(2)计算以该结点的 point 域中的值为圆心,  $r$  域中的值为半径的圆存在概率  $P_c$ ,并将其储存在该结点的  $p$  域。如果  $P_c$  大于设定的存在概率阈值  $P_{c_0}$ ,则将对应的圆心坐标、半径、边缘点个数、圆存在概率储存在 chain2 中的结点中。链表 chain2 中储存了存在概率值大于设定阈值的圆的参数。将链表 chain1 清空,变换圆心,重复上述过程,直到此圆心范围 C 内的每一个潜在圆心点都计算在内。

当一条边缘曲线所对应的圆心范围 C 内的所有点都被计算在内后,再对下一条曲线所对应的圆心范围内的点计算其存在概率,直到所有的边缘曲线计算完。链表 chain2 中储存了图像中所有圆心点的存在概率值。从 chain2 中按存在概率  $P_c$  由大到小选取  $m$  个结点,获得原始图像中的  $m$  个圆的参数。将得到的圆半径的像素尺寸与单个像素代表的实际大小相乘即可得到圆的实际大小。

### 1.4 具体步骤

1) 对工业 CT 图像进行预处理,提取图像边缘,经过去毛刺、去除孤立点等操作后得到封闭曲线。

2) 利用 Freeman 链码跟踪法对封闭轮廓进行跟踪并储存边缘点。

3) 构造记录圆参数的空链表 chain1 和 chain2。确定待检圆的个数  $m$ 、最小半径  $R_{\min}$ 、最大半径  $R_{\max}$

及存在概率阈值  $P_{e_0}$ 。

4) 确定第一条边缘曲线对应的圆心选取范围  $C$ 。

5) 对于圆心范围  $C$  内的任一点,利用公式(3)依次计算与  $C$  对应的边缘轮廓上的每个边缘点到该圆心点的距离  $r_i$ ,如果满足  $R_{min} < r_i < R_{max}$ ,遍历 chain1,若链表中不存在与  $r_i$  相接近(其差的绝对值小于规定的阈值)的半径,则生成一个新结点,其  $r$  域中的值设为  $r_i$ ,对应的  $k$  域中的值设为 1,将新结点插入链表;否则,将对应结点的  $k$  域中的值加 1。

6) 遍历 chain1,寻找  $k$  域中的值最大的结点,利用公式(2)计算以该结点的  $P$  域中的值为圆心, $r$  域中的值为半径的圆存在概率  $P_e$ 。如果  $P_e > P_{e_0}$ ,利用最小二乘法拟合边缘点,得到圆半径,将对应的圆心坐标、半径、边缘点个数、圆存在概率插入 chain2,将 chain1 清空。

7) 对圆心范围  $C$  中的每一点重复执行步骤 5、6。

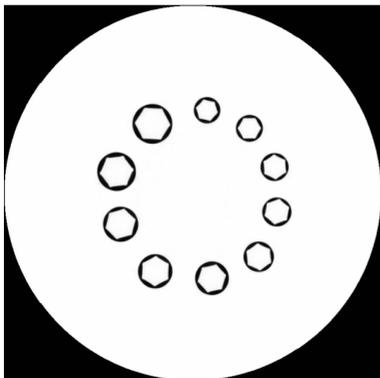
8) 对每一条边缘曲线重复执行步骤 4、5、6、7,获得一条记录圆参数的链表 chain2。

9) 遍历 chain2,按照存在概率  $P_e$  从大到小选择  $m$  个结点数据,这样便得到了原图像中圆的圆心坐标和半径的像素尺寸。

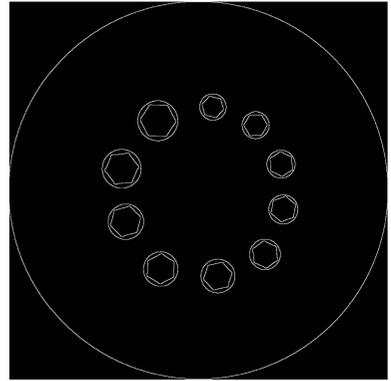
10) 将圆半径的像素尺寸与单个像素代表的实际大小相乘,得到圆半径的实际大小。

### 2 试验结果及分析

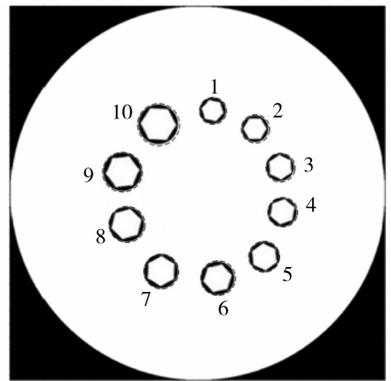
对一组套筒扳手零件进行测量,图 3 为其处理结果,图 3(a)为原始工业 CT 图像,图 3(b)为图像边缘,图 3(c)为检测到的圆与原始图像的对比图,图像中的 10 个圆分别用数字 1 到 10 标记。该测量运算所用的时间为 2.593 s。



(a) 一组套筒扳手零件工业 CT 图像



(b) 图像边缘



(c) 检测到的圆与原始图像的对比图

图 3 一组套筒扳手零件工业 CT 图像测量结果

表 1 列出了套筒扳手零件工业 CT 图像中的圆的参数,表 2 为测量值与真实值及其之间的相对误差。表 3 列出了同一工件经工业 CT 机扫描成像时得到不同大小图像的测量值。表 4 列出了不同大小的 CT 图像与真实值的相对误差,其中图像 A、B、C、D 分别表示同一工件经工业 CT 扫描得到的不同大小的图像。

表 1 套筒扳手零件工业 CT 图像中的圆参数

圆序号	存在概率	圆心/像素	半径/像素	半径/mm
1	0.799	(429,576)	27.806	13.864
2	0.816	(520,537)	28.462	14.191
3	0.903	(573,455)	29.520	14.718
4	0.820	(578,360)	30.663	15.288
5	0.887	(540,264)	32.184	16.047
6	0.775	(440,219)	35.670	17.785
7	0.850	(320,233)	36.255	18.076
8	0.846	(246,333)	37.173	18.534
9	0.748	(237,445)	40.873	20.379
10	0.877	(314,547)	42.156	21.019

表 2 测量值与真实值的对比 mm

圆序号	真实值 $c_1$	研究方法 $c_2$	$c_2 - c_1$	相对误差/( $e/\%$ )
1	13.925	13.864	-0.061	-0.438
2	14.240	14.191	-0.049	-0.344
3	14.780	14.718	-0.062	-0.419
4	15.350	15.288	-0.062	-0.404
5	16.075	16.047	-0.028	-0.174
6	17.810	17.785	-0.025	-0.140
7	18.125	18.076	-0.049	-0.270
8	18.590	18.534	-0.056	-0.301
9	20.420	20.379	-0.041	-0.201
10	21.030	21.019	-0.011	-0.052

表 3 中,图像 A 像素大小为  $800 \times 800$ ,视场直径为 398.872 mm,像素尺寸为 0.498 59 mm;图像

B 像素大小为  $600 \times 600$ ,视场直径为 398.872 mm,像素尺寸为 0.664 79 mm;图像 C 像素大小为  $400 \times 400$ ,视场直径为 398.872 mm,像素单位尺寸为 0.997 18 mm;图像 D 像素大小为  $200 \times 200$ ,视场直径为 398.872 mm,像素单位尺寸为 1.994 36 mm。

由表 2 可以看出,笔者方法测量结果比真实值偏小,半径测量值的绝对误差小于 0.1 mm,相对误差小于 0.5%。文献[12]中对圆的测量是根据灰度图像的矩理论,利用圆心与重心重合的特点,对采用面阵 CCD 采集得到的物体图像进行二值化,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,其测量系统相对误差小于 1%。

由表 3 和表 4 可以看出,同一图像中的圆越大,其测量值与真实值的相对误差越小;同一工件扫描得到的不同大小的 CT 图像测量结果相比,图像越大,其测量值与真实值的相对误差越小。

表 3 不同大小的 CT 图像测量半径值

圆序号	图像 A/像素	图像 A/mm	图像 B/像素	图像 B/mm	图像 C/像素	图像 C/mm	图像 D/像素	图像 D/mm
1	27.806	13.864	20.882	13.882	13.769	13.730	6.646	13.255
2	28.462	14.191	21.380	14.213	14.144	14.104	6.839	13.639
3	29.520	14.718	22.220	14.772	14.627	14.586	7.146	14.252
4	30.663	15.288	23.072	15.338	15.217	15.174	7.414	14.786
5	32.184	16.047	24.223	16.103	15.960	15.915	7.757	15.470
6	35.670	17.785	26.808	17.822	17.747	17.697	8.627	17.205
7	36.255	18.076	27.223	18.098	18.062	18.011	8.789	17.528
8	37.173	18.534	27.896	18.545	18.440	18.388	8.942	17.834
9	40.873	20.379	30.668	20.388	20.331	20.274	9.892	19.728
10	42.156	21.019	31.644	21.037	20.974	20.915	10.244	20.430

表 4 不同大小的 CT 图像与真实值的相对误差  $e/\%$ 

圆序号	图像 A	图像 B	图像 C	图像 D
1	-0.438	-0.309	-1.400	-4.811
2	-0.344	-0.190	-0.955	-4.221
3	-0.419	-0.054	-1.313	-3.572
4	-0.404	-0.078	-1.147	-3.674
5	-0.174	0.174	-0.995	-3.764
6	-0.140	0.067	-0.634	-3.397
7	-0.270	-0.149	-0.629	-3.294
8	-0.301	-0.242	-1.087	-4.067
9	-0.201	-0.157	-0.715	-3.388
10	-0.052	0.033	-0.547	-2.853

### 3 结 论

1) 工业 CT 技术在逆向工程中具有重要的作用,利用 CT 测量法对工件进行测量不具破坏性,对封闭工件内腔的无损检测是其他方法不可替代的。

2) 利用基于存在概率的圆检测方法可以快速、有效地检测出工业 CT 图像中的圆,标识其位置,获得其参数,因此利用此方法进行圆测量是可行的。

3) 利用研究方法测量结果与真实值的相对误差小于 0.5%,测量时间在几秒之内,测量精度与时间符合实际要求,可以实现对工件的精密测量。

4) 利用 CT 测量法对同一工件进行测量时,工件扫描得到的 CT 图像越大,测量结果与真实值的相对误差越小,测量精度越高。

由于加工后的工件圆形状都存在误差,工件圆大多数都是以非圆形状来表现的,因此,当圆的存在概率值小于设定的阈值时,判定该图不为圆;否则将该图识别为圆。对于圆的测量是利用最小二乘拟合得到的圆参数,与实际工件的真实值存在一定的误差。笔者对于工件的测量只考虑了圆形结构,今后的工作将继续研究椭圆及其他形状工件的测量。

#### 参考文献:

- [1] 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 JIN, LI YAO-MING. Development in key technologies of reverse engineering [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology,2007,43(1):5-7.
- [2] LEE H, CHEONSOO Y. A form driven object-oriented reverse engineering methodology[J]. Information Systems, 2000,(25):235-259.
- [3] WEIR D, MILROY C, et al. Reverse engineering physical models employing wrap-around B-spline surfaces and quadratics[J]. Proceedings of Institution Mechanical Engineering,1996,210:147-157.
- [4] 丁汉,朱利民,熊振华. 复杂曲面快速测量、建模及基于测量点的 RP 和 NC 加工[J]. 机械工程学报,2003,39(11):28-37.  
DING HAN, ZHU LI-MIN, XIONG ZHEN-HUA. Survey on coordinate measurement, geometric modeling and RP or NC code generation from measured data points[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(11):28-37.
- [5] PREIFER T, KUROKAWA S, MEYER S. Derivation of parameters of global form deviations for 3-dimensional surfaces in actual manufacturing processes [J]. Measurement,2001,29(3):179-200.
- [6] ATTA M H, KOPS L. Computer simulation of nonlinear thermo-elastic behavior of a joint in machine tool structure and its effect on thermal deformation [J]. Journal of Engineering for Industry,1979,101(8):355-361.
- [7] 张爱武,李明哲,胡少兴,等. 基于计算机视觉的板类零件曲面测量系统[J]. 中国图象图形学报,2002,7(2):190-195.  
ZHANG AI-WU, LI MING-ZHE, HU SHAO-XING, et al. Surface measurement system of sheet metal parts based on computer vision [J]. Journal of Image and Graphics,2002,7(2):190-195.
- [8] 罗雄彪,陈铁群,万英. 超声检测信号中的小波包分析[J]. 机械工程学报,2006,42(4):142-146.  
LUO XIONG-BIAO, CHEN TIE-QUN, WAN YING. Wavelet packet analysis to signal in ultrasonic testing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(4):142-146.
- [9] XIAO C C, HASSAN F. Camera calibration using symmetric objects [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006,15(11):3614-3619.
- [10] FARAJI H, MACLEAN W J. CCD noise removal in digital images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006,15(9):2676-2685.
- [11] ZHU J G, LI Y J, YE SH H. Calibration of line structured light vision system based on camera's projective center[J]. Optics and Precision Engineering, 2005,13(5):584-591.
- [12] 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(S):101-103.  
DENG JIN-JUN, YUAN WEI-ZHENG, LI XIAO-YING, et al. Image measurement of micro-machined device's dimension and shape[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2002,38(S):101-103.
- [13] 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 LI-FU, LIU FENG-LIN. Image measurement of computed tomography for processing polymer configuration [J]. Optics and Precision Engineering, 2004,12(3):111-114.
- [14] 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 YUN-CHU, WANG HONG-MING, LIANG ZI-ZE, et al. Existence probability map based circle detection method [J]. Computer Engineering and Applications,2006,29:49-51.
- [15] FREEMAN H. On the encoding of arbitrary geometric configurations [J]. IEEE Transactions on Electron Comput EC, 1961(10):260-268.

(编辑 侯 湘)