

文章编号: 0253-2239(2006)05-0697-5

# 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法

李为民 俞巧云 刘 超

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230027)

**摘要:** 采用分离式差分标定方法实现对单摄像机的高精度标定。在摄像机的物面位置上放置多个小尺度的分离式标定靶, 每个标定靶上有标准点阵列, 对每个光点由高斯曲面拟合法得到其 CCD 像面上的位置, 光点位置检测结果的稳定性(均方根)达到  $1 \mu\text{m}$ (相当于 CCD 0.0053 pixel)。利用同一标定靶上标准点之间的物面差分坐标, 进行四次曲面拟合, 建立摄像机的像面与物面之间的映射关系。该方法对各个标定靶之间的距离没有提出要求, 采用多个小尺寸的差分标定靶代替整体式的大尺度标定靶, 降低对大尺度标定靶的制作要求。实验表明, 当各个标定靶之间的相对角度误差小于  $60''$  时, 标定残差平均值可以达到  $4.8 \mu\text{m}$ (相当于 CCD 0.028 pixel)。

**关键词:** 机器视觉; 摄像机标定; 差分式标定; 分离式标靶; 曲面拟合

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Calibration Method with Separation Pattern of a Single-Camera Based on Difference Coordinates

Li Weimin Yu Qiaoyun Liu Chao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

**Abstract:** The difference calibration and separation patterns are used to calibrate a single-camera with high precision. Several separation calibration patterns with small size are put on the object plane of the camera. Each pattern has some spot array with high precision. Gaussian curved-surface fitting method is used to get the position of spot on the CCD image plane, and the stability (RMS) of measurement result of the spot position is  $1 \mu\text{m}$  (about 0.0053 CCD pixel). The object plane difference coordinates of the reference points on the same calibration pattern are used to calibrate the camera. The mapping relationship between the object plane and the image plane is established with the biquadratic curved-surface fitting method. There is not need for the distance between the patterns. The integer pattern with large dimension is replaced by the several small difference patterns. The difficulty to manufacture the large pattern is avoided. When the error of the relative angle between the patterns is less than  $60''$ . The experiment results show that the calibrated mean value of residual error is  $4.8 \mu\text{m}$  (about 0.028 CCD pixels).

**Key words:** machine vision; camera calibration; difference calibration; separation pattern; curved-surface fitting

## 1 引 言

影响 CCD 摄像测量系统精度的因素很多, 主要有成像系统的几何畸变误差、CCD 像面与摄像机光轴不严格垂直等。为了获得高精度的测量结果, 需要对摄像机进行标定。摄像机标定一般有三种方法: 经典标定方法、主动视觉中的标定方法和自标定方法<sup>[1~10]</sup>。经典标定方法需要使用具有高精度标准点的标定参照物, 通过建立标定参照物上坐标已知的标准点与其图像点间的对应关系, 来计算摄像机的内外

参量。主动视觉中的标定方法需要控制摄像机做某些特殊运动, 利用这种运动的特殊性对摄像机进行标定。自标定技术主要应用于场景未知和摄像机任意运动的一般情形下, 利用摄像机在运动过程中周围环境的图像之间的对应关系对摄像机进行标定。

由于需要利用标准参考点, 经典标定方法依赖于标定参考物, 不适用于在线标定和不方便安放整体式标定参考物的场合。主动视觉中的标定方法和自标定方法需要移动摄像机, 且在精密测量系统中

作者简介: 李为民(1972~), 男, 安徽濉溪人, 中国科学技术大学副教授, 主要从事机器视觉、光电检测、信号处理方面的研究。E-mail: liwm@ustc.edu

收稿日期: 2005-05-20; 收到修改稿日期: 2005-09-05

所能达到的测量精度不如经典标定方法。

在精密光电检测系统中,单摄像机的标定一般多采用经典标定方法,采用一块整体式的标定参考物对摄像机进行标定。标定的精度在很大程度上依赖于标定参考物上标准点的位置精度。当物面范围比较大时,大尺度、高精度的标定参考物的制作比较困难,从而对标定精度产生较大影响。为此,提出一种具有多个分离式差分标定板的单摄像机标定方法。将多个分离式的小尺度标定参考物,分布在摄像机视场中;各个标定参考物之间的距离可以未知,利用同一标定参考物中的标准点之间的差分坐标实现对单摄像机的标定。

### 2 光点阵列的标定方法

在国家九五大科学工程大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)的焦面光纤定位系统中,需要一套测量装置检测光纤的二维坐标位置<sup>[11]</sup>。由于被测目标是光纤,很难运用接触式方法进行检测,而需要采用光电检测系统进行测量。在单元定位精度检测装置中,采用面阵 CCD 摄像机获取光纤端部所发出的光点图像,由计算机进行图像处理得到光纤端部的坐标位置。焦面光纤定位系统要求单元位置检测系统的测量精度达到 13 μm。为实现这一测量精度,需要对摄像机进行高精度的标定。

经典标定方法中,通常采用正交网格平面标定板实现对单摄像机的标定。将准备好的高精度标准正交网格板放置在待测目标的位置,然后进行拍摄。再通过检测足够多的网格节点位置,建立物面和像面之间的映射关系。网格板的尺寸一般要求与待测目标大致相当。网格节点需要具有足够的精度,以保证摄像机具有较高的标定精度。

在 LAMOST 光纤单元测量系统中,对 CCD 摄像机的标定,没有采用正交网格平面标定板,而是采用主动发光的光点阵列标定靶,如图 1 所示。

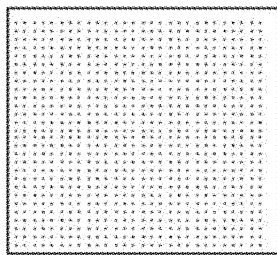


图 1 整体式标定靶上的光点阵列示意图  
Fig. 1 Schematic of the spot array on the integer calibration pattern

### 2.1 光点阵列标定靶的制作

标定靶的结构如图 2 所示。在遮光的玻璃标定板上通过半导体刻蚀工艺加工出透光的圆孔阵列,相邻孔间距为 5 mm,且横竖两个方向正交,圆孔的位置精度达到 0.5 μm。在标定靶的背面用面型 LED 照明,通过透光的孔,在靶的正面形成 28×28 光点阵列。

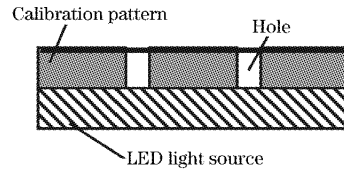


图 2 点阵列标定靶结构示意图  
Fig. 2 Configuration of the spot array on the calibration pattern

### 2.2 光点检测方法

计算机采集的光点二维灰度图像为  $f(x, y)$ ,如图 3 所示。 $f(x, y)$  对应光点的光强分布,其中  $(x, y)$  代表了相应点在面阵 CCD 上像素位置的行数、列数,对应像面直角坐标系中的坐标。

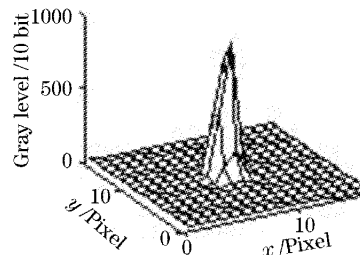


图 3 标定靶上光点的灰度分布示意图  
Fig. 3 Schematic of the gray distribution of light spot on the calibration pattern

光点位置检测有极大值法、模板法<sup>[12]</sup>、曲面拟合法等。这里运用曲面拟合法检测光点位置。

一个二维高斯曲面方程可以表示为

$$g(x, y) = G \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right], \tag{1}$$

其中  $G$  为高斯分布的幅值,  $x_0, y_0$  为高斯分布的中心,  $\sigma_x, \sigma_y$  为两个方向上的标准差。

对于光点灰度分布  $f(x, y)$ , 运用最小二乘法拟合得到函数  $g(x, y)$ , 使拟合结果的均方误差和最小。其拟合参数为  $G', x'_0, y'_0, \sigma'_x, \sigma'_y$ 。以拟合函数的极值点  $(x'_0, y'_0)$  表征光点位置。高斯曲面拟合方法检测光点位置的均方误差 (RMS)、极差, 如表 1 所示。

表 1 高斯曲面拟合方法检测光点位置的稳定性

Table 1 Stability (RMS) of measurement results of the spot position with Gaussian curved-surface fitting method

	RMS /pixel	Maximum error /pixel
<i>x</i>	0.0039	0.0237
<i>y</i>	0.0053	0.0286

本系统中,像面每个 CCD 像素尺寸相当于物面上 174.9 μm。

### 2.3 标定方程

由摄像机得到标定靶 28×28 个光点的像面坐标后,利用这 784 个标准点的像面坐标,建立物面坐标系 *uov* 与像面坐标系 *xoy* 的映射关系。采用四次曲面拟合的方法,得到从 *xoy* 坐标转换到 *uov* 坐标的各个参量,这些参量中已经包含了镜头几何畸变、像面与成像光学系统不垂直等误差的影响。

对于标定靶上的任意点,物面坐标 (*u, v*) 可以用像面坐标 (*x, y*) 表示,如(2)式、(3)式所示。

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy + a_6x^3 + a_7y^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}x^4 + a_{11}y^4 + a_{12}xy^3 + a_{13}x^3y + a_{14}x^2y^2, \quad (2)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy + b_6x^3 + b_7y^3 + b_8x^2y + b_9xy^2 + b_{10}x^4 + b_{11}y^4 + b_{12}xy^3 + b_{13}x^3y + b_{14}x^2y^2, \quad (3)$$

对于像场内的 784 个点,可以列出 784 组这样的方程,用最小二乘方法求解出 30 个参量 ( $a'_0, a'_1, \dots, a'_{14}, b'_0, b'_1, \dots, b'_{14}$ ),具体的数值如表 2 所示。利用这 30 个参量,将标定板上 784 个光点的像面坐标 (*x, y*) 代入(2)式、(3)式,可以求解这 784 个点在物面的拟合坐标 ( $u', v'$ ),这样就可以得到曲面拟合解 ( $u', v'$ ) 和点实际坐标 (*u, v*) 之间的残差 ( $\Delta u = u - u', \Delta v = v - v'$ )。

此时,位置残差为  $\Delta r = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}$ 。

表 2 分别采用整体式和差分式标定板的标定方程的参量

Table 2 Parameters of calibration equation with integer pattern and difference pattern

<i>i</i>	Integer pattern		Difference and separation pattern	
	$a'_i$	$b'_i$	$a'_i$	$b'_i$
0	-3.11171927559155	-2.96353738518535	-3.10791574764910	-2.95480979170476
1	0.00436419185621	0.35650995116671	0.00363709684412	0.35621264510791
2	0.35231101661054	0.00182151675455	0.35242400717181	0.00126780577052
3	-0.00005010780431	-0.00014042990152	-0.00001420520237	-0.00010868014112
4	-0.00005197196349	-0.00002866912120	-0.00004106211881	0.00000766637509
5	-0.00009475615290	-0.00001790772577	-0.00012174481682	-0.00005714299753
6	0.00000024676340	0.00000077495550	-0.00000025928072	0.00000019886180
7	0.00000055944374	-0.00000004951007	0.00000030239025	-0.00000067905823
8	0.00000061478032	-0.00000007781012	0.00000080817771	0.00000023975157
9	-0.00000003070256	0.00000056787891	0.00000032064633	0.00000105773750
10	-0.00000000125142	-0.0000000070010	0.00000000109551	0.00000000216654
11	0.00000000059775	0.0000000004282	0.00000000190504	0.00000000320278
12	-0.00000000013584	0.00000000100687	-0.00000000049780	0.00000000052769
13	0.00000000013010	0.00000000091640	0.00000000023604	0.00000000167426
14	0.00000000043894	-0.00000000065112	-0.00000000209091	-0.00000000513262

计算得到 784 个点的位置残差平均值为 2.6008 μm,方差为 1.6687 μm。标定后,784 个点的残差分布分段统计结果如表 3、表 4 所示。

表 3 不同标定方式下的标定残差统计情况

Table 3 Statistics of the residual error with different calibration methods

Number of points /μm	Integer pattern	Separation pattern	Difference pattern
<5	727	661	545
5~10	55	118	221
10~15	1	3	16
15~20	1	2	1
20~30	0	0	1

表 4 不同标定方式下标定残差的均值、方差和最大值

Table 4 Mean value, standard deviation and maximum value of the residual error with different calibration methods

Residual error /μm	Integer pattern	Separation pattern	Difference pattern
Mean value	2.6008	3.2479	3.8627
Standard deviation	1.6687	1.9942	2.1697
Maximum value	18.17788	15.60095	25.03860

### 3 多个分离式标靶的标定方法

单摄像机的标定参考物一般采用整体式标定

靶,标定靶尺寸一般要求与待测目标大致相当。当被测目标尺寸比较大时,大尺度、高精度的标定靶的制作比较困难。

为此,可以采用多个分离式标定靶实现对单摄像机的标定。对于图 1 所示的整体式标定靶,选取中心和四个角上的五个小区域的标准点的绝对坐标代入拟合方程(2)、(3)进行拟合,其中每个小区域内均包含  $5 \times 5$  个标准点,如图 4 所示,此时相当于在物面上放置了五个小尺度的标定靶。

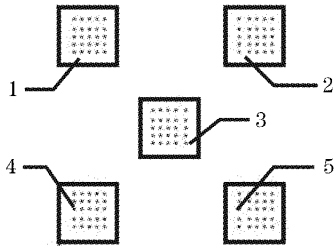


图 4 分离式标定靶上的光点阵列示意图

Fig. 4 Schematic of the spot array on separation calibration pattern

将五块小的标定靶上 125 个点的绝对坐标代入拟合方程(2)、(3),得到拟合参量,计算得到整个大标定靶上 784 个点的位置残差平均值为  $3.2479 \mu\text{m}$ ,方差为  $1.9942 \mu\text{m}$ 。标定后,784 个点的残差分布分段统计结果如表 3、表 4 所示。

采用多个分离式标靶对单摄像机的标定,可以达到所需要的标定精度。但是,在上述标定过程中,需要知道各个标定靶之间相对精确坐标,这在实际系统中有一定的困难,因为大尺度空间距离的测量很难达到较高的精度。

#### 4 差分式标定方法

由于在实际系统中很难得到各个分离式小标定板之间的距离,为此可以将各个小标定靶上标准点之间的差分坐标代入标定方程实现标定,避免对其绝对坐标的要求。

各个小标定靶内的若干标准点之间相对位置由标定板自身的精度决定。由于各个小标定靶在物面绝对坐标位置未知,所以各个标准点在物面内的绝对距离坐标无法得到。但是同一小尺度标定靶内的各个标准点之间的相对位置是精确已知的,各个标准点之间的差分坐标也是可以知道的,所以可以利用差分坐标确立物像映射关系。

同一标定靶内两个标准点  $O_1(u_1, v_1)$ 、 $O_2(u_2, v_2)$

之间差分坐标  $(\Delta u, \Delta v)$  可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta u = u_1 - u_2 = & a_1(x_1 - x_2) + a_2(y_1 - y_2) + \\ & a_3(x_1^2 - x_2^2) + a_4(y_1^2 - y_2^2) + \\ & a_5(x_1 y_1 - x_2 y_2) + a_6(x_1^3 - x_2^3) + \\ & a_7(y_1^3 - y_2^3) + a_8(x_1^2 y_1 - x_2^2 y_2) + \\ & a_9(x_1 y_1^2 - x_2 y_2^2) + a_{10}(x_1^4 - x_2^4) + \\ & a_{11}(y_1^4 - y_2^4) + a_{12}(x_1 y_1^3 - x_2 y_2^3) + \\ & a_{13}(x_1^3 y_1 - x_2^3 y_2) + a_{14}(x_1^2 y_1^2 - x_2^2 y_2^2), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta v = v_1 - v_2 = & b_1(x_1 - x_2) + b_2(y_1 - y_2) + \\ & b_3(x_1^2 - x_2^2) + b_4(y_1^2 - y_2^2) + \\ & b_5(x_1 y_1 - x_2 y_2) + b_6(x_1^3 - x_2^3) + \\ & b_7(y_1^3 - y_2^3) + b_8(x_1^2 y_1 - x_2^2 y_2) + \\ & b_9(x_1 y_1^2 - x_2 y_2^2) + b_{10}(x_1^4 - x_2^4) + \\ & b_{11}(y_1^4 - y_2^4) + b_{12}(x_1 y_1^3 - x_2 y_2^3) + \\ & b_{13}(x_1^3 y_1 - x_2^3 y_2) + b_{14}(x_1^2 y_1^2 - x_2^2 y_2^2), \quad (5) \end{aligned}$$

由于同一标定靶上任意两个标准点之间的差分坐标  $(\Delta u, \Delta v)$  为已知,与各个标定靶之间的相对距离无关。对于图 4 中所示的五块小尺度标定靶上的 125 个标准点,使用差分标定方程(4)、(5),可以得到 28 个标定参量  $(a'_1, a'_2, \dots, a'_{14}, b'_1, b'_2, \dots, b'_{14})$ 。

由于差分标定方程(4)、(5)中没有  $a'_0, b'_0$  这两个参量,所以无法直接得到这两个标定参量。对于五块小尺度标定靶,很难高精度地测量它们之间的距离;可以用图 4 中所示的标定靶 3 作为物面坐标参考原点计算  $a'_0, b'_0$ 。将上述 28 个标定参量、视场中间位置处标定靶 3 上的 25 个标准点坐标代入方程(6)、(7),可以得到 25 个不同的  $a'_0(i), b'_0(i)$ ,取其平均值,可以得到  $a'_0, b'_0$ :

$$\begin{aligned} a'_0 = u - (a'_1 x + a'_2 y + a'_3 x^2 + a'_4 y^2 + a'_5 xy + \\ a'_6 x^3 + a'_7 y^3 + a'_8 x^2 y + a'_9 xy^2 + a'_{10} x^4 + \\ a'_{11} y^4 + a'_{12} xy^3 + a'_{13} x^3 y + a'_{14} x^2 y^2), \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b'_0 = v - (b'_1 x + b'_2 y + b'_3 x^2 + b'_4 y^2 + b'_5 xy + \\ b'_6 x^3 + b'_7 y^3 + b'_8 x^2 y + b'_9 xy^2 + b'_{10} x^4 + \\ b'_{11} y^4 + b'_{12} xy^3 + b'_{13} x^3 y + b'_{14} x^2 y^2), \quad (7) \end{aligned}$$

由方程(4)~(7),可以得到 30 个标定参量  $(a'_0, a'_1, \dots, a'_{14}, b'_0, b'_1, \dots, b'_{14})$ ,如表 2 所示,从而可以建立像面、物面之间的映射关系。计算得到 784 个点的位置残差平均值为  $3.8627 \mu\text{m}$ ,方差为  $2.1697 \mu\text{m}$ 。残差分布分段统计结果如表 3、表 4 所示,残差分布情况如图 5 所示。

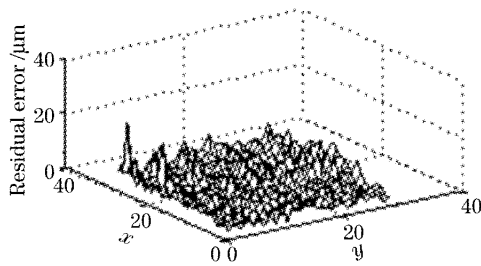


图 5 采用分离式差分标定靶的残差分布图

Fig. 5 Distribution of residual error in the difference and separation pattern

## 5 各标定靶相对位置对标定结果的影响

分离式差分标定方法中,各个标定参考物之间的距离可以未知,不必进行距离测量,只需测量各个标定靶之间的相对角度即可。如果各个标定靶之间的相对角度误差为  $41.25''$  时,则标定残差的平均值为  $4.5757 \mu\text{m}$ ,方差为  $2.6388 \mu\text{m}$ 。在该方法中,对各个标定靶不要求严格共面。如果各个标定靶相对于被测物面存在倾斜角度误差  $60''$ ,则标定残差平均值为  $4.8288 \mu\text{m}$ ,方差为  $2.8038 \mu\text{m}$ 。

## 6 结 论

提出了一种具有多个分离式差分标定靶的标定方法,采用多个分离式的小尺度标定靶分布在摄像机物面上。再利用同一标定靶中的标准点之间的差分坐标实现对单摄像机的标定。相对于整体式标定,该方法的标定精度要低一点,标定残差的均值、极值均比整体式标定的大。但是,其所需要的标定靶的尺寸比整体式标定要小,标定靶的制作难度降低了,且不需要测量各个标定靶之间的距离,只需测量各个标定靶之间的相对角度即可,角度测量的精度只要达到  $60''$ 。当各个标定靶之间的相对角度误差小于  $60''$  时,标定残差的平均值为  $4.8 \mu\text{m}$ (相当于 CCD  $0.028 \text{ pixel}$ )。各个标定靶的空间安放位置可以进行适当调整,这适用于视场内的某些特定位置不宜放置标定靶的应用场合。适用于对大视场、高精度标定的场合。

## 参 考 文 献

- 1 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **RA-3**(4): 323~344
- 2 Song Dema. A self-calibration technique for active vision systems [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, **12**(1): 114~120
- 3 S. J. Maybank, O. D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. *International J. Computer Vision*, 1992, **8**(2): 123~151
- 4 Meng Xiaoqiao, Hu Zhanyi. Recent progress in camera self-calibration[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(11): 110~124 (in Chinese)  
孟晓桥,胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. *自动化学报*, 2003, **29**(11): 110~124
- 5 Huang Fengrong, Hu Zhanyi, Wu Yihong. A new method on single view metrology[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(7): 487~495 (in China)  
黄凤荣,胡占义,吴毅红. 单幅图像测量的一种新方法[J]. *自动化学报*, 2004, **30**(7): 487~495
- 6 Wu Fuchao, Ruan Zongcai, Hu Zhanyi. Self-calibration of a camera with a non-linear model[J]. *Chin. J. Computers*, 2002, **25**(3): 276~283 (in Chinese)  
吴福朝,阮宗才,胡占义. 非线性模型下的摄像机自标定[J]. *计算机学报*, 2002, **25**(3): 276~283
- 7 Hu Zhanyi, Wu Fuchao. A review on some active vision based camera calibration techniques[J]. *Chin. J. Computers*, 2002, **25**(11): 1150~1156 (in Chinese)  
胡占义,吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. *计算机学报*, 2002, **25**(11): 1150~1156
- 8 Meng Xiaoqiao, Hu Zhanyi. A new easy camera calibration technique based on circular points [J]. *J. Software*, 2002, **13**(5): 957~965 (in Chinese)  
孟晓桥,胡占义. 一种新的基于圆环点的摄像机自标定方法[J]. *软件学报*, 2002, **13**(5): 957~965
- 9 Li Hua, Hu Zhanyi. A linear camera self-calibration technique based on projective reconstruction [J]. *J. Software*, 2002, **13**(12): 2286~2296 (in Chinese)  
李 华,胡占义. 基于射影重建的线性摄像机自标定方法[J]. *软件学报*, 2002, **13**(12): 2286~2296
- 10 Wu Fuchao, Hu Zhanyi. Linear determination of the infinite homography and camera self-calibration [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(4): 488~496 (in Chinese)  
吴福朝,胡占义. 线性确定无穷远平面的单应矩阵和摄像机自标定[J]. *自动化学报*, 2002, **28**(4): 488~496
- 11 Li Weimin, Xing Xiaozheng, Yi Jin *et al.*. The measurement system for fiber positioning unit of LAMOST[C]. *Proc. SPIE*, **5492**: 584~591
- 12 Yu Xinrui, Wang Shigang, Guang Baiqing *et al.*. A fast interference-resistant deformable template method for detecting the circle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1115~1119 (in Chinese)  
于新瑞,王石刚,关柏青等. 一种快速检测圆的抗干扰变形模板方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1115~1119