

文章编号: 0253-2239(2010)07-2041-06

# 基于标准互相关算子的直线图像特征快速 测量方法

孙明磊 文 闻 宗光华

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

**摘要** 直线图像特征在实际中应用很多,且多数情况下要求对其快速测量。传统标准互相关算子(NCCO)匹配方法计算量大、速度较慢。分析了 NCCO 匹配搜索方法的本质,以图像特征概率分布的形式给出了 NCCO 在二值图像匹配下的相似函数计算式。通过设计特殊模板,并利用直线特征的自身特点,从原理上推导并证明了求解直线型图像特征参数的计算公式,据此提出直线型图像特征的快速测量方法。中等噪声强度的仿真图像实验结果表明,直线特征倾角  $\alpha$  的测量正确度在  $0.24^\circ \sim 0.98^\circ$ 。最后,将测量算法应用于微对准装配系统中标记图像的粗定位,实测该算法在实时性上要远优于传统模板匹配方法,甚至高于传统拟合方法约 2.5 倍。

**关键词** 信息光学;显微视觉;特征测量;标准互相关

**中图分类号** TP 242.6<sup>+</sup>2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.2041

## A Method for Fast Measuring Line-Shaped Image Feature Based on Normalized Cross Correlation Operator

Sun Minglei Wen Wen Zong Guanghua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Line-shaped image features are widely applied in many cases and the measurement is required as fast as possible. However, a traditional method (normalized cross correlation operator, NCCO) which is used for pattern matching in microscopic vision needs lots of calculations for a considerable time. Inspired by this, some research work about pattern matching of geometric image features is presented. Firstly, a probability distribution of image features is worked out to describe functions with the operator NCCO through matching two binary images. Secondly, the formulas with linear image parameters are derived and certified by designing special templates and line-shaped features. Based on this model, a measuring algorithm of line-shaped image features is proposed. The simulation studies of the image mixed with moderate-intensity noise conclude that the algorithm accuracy of angle  $\alpha$  is up to  $0.24^\circ \sim 0.98^\circ$ . Finally, the algorithm is applied in a hybrid microassembly work-bench to measure the feature's position. Experimental results show that the algorithm based on NCCO mathematic model is more precise than traditional method in real-time process.

**Key words** information optics; microscopic vision; feature measuring; normalized cross correlation

### 1 引 言

直线特征的定位在视觉标定、视觉引导、视觉对准、目标跟踪等领域应用很多<sup>[1~4]</sup>。针对这类问题, Hough 变换通过空间变换的方法,能够对直线特征

进行亚像素定位,其优点是抗噪声能力强,检测精度高;缺点是计算量很大<sup>[5~7]</sup>。另外,可以利用模板匹配方法检测直线特征,但经常需要介入模板旋转变换,求得直线特征的倾角,计算量同样非常可

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-11-06

基金项目: 北京市自然科学基金(4092026)、教育部博士点新教师基金(20091102120022)和中央高校基本科研业务费专项基金(YWF-10-02-054)资助课题。

作者简介: 孙明磊(1974—),男,博士,讲师,主要从事机器人视觉、微机器人技术等方面的研究。

E-mail: sunminglei@gmail.com

观<sup>[8~11]</sup>。本文从推导图像直线特征的标准互相关算子(NCCO)函数解析式入手,提出一种建立在NCCO模型基础上的直线图像特征快速测量方法,拟改善传统直线特征定位算法实时性的劣势。

## 2 原 理

设  $I$  是大小为  $u \times v$  的目标灰度图像;  $T$  是大小为  $m \times n$  的模板灰度图像阵列。  $I$  与  $T$  均为只包含

两种灰度的理想二值图像。设  $T$  中包含  $n_{th}$  个灰度值为  $g_{th}$  的像素构成图像特征,同时由  $n_{tl}$  个灰度值为  $g_{tl}$  的像素构成图像背景。  $I_{xy}$  是  $I$  在任意位置  $(x, y)$  子图,其大小为  $m \times n$ ; 设  $I_{xy}$  中包含  $n_{oh}$  个灰度值为  $g_{oh}$  的像素构成了图像特征,同时包含  $n_{ol}$  个灰度值为  $g_{ol}$  的像素构成了图像背景(如图 1 所示)。对于 NCCO,有离散形式表达式

$$C(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \{ [I_{xy}(i, j) - \bar{I}_{xy}] [T(i, j) - \bar{T}] \}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I_{xy}(i, j) - \bar{I}_{xy}]^2 \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [T(i, j) - \bar{T}]^2}} \quad (1)$$

根据文献[12],有二值图像的 NCCO 算子计算式

$$C(x, y) = \frac{n_1 n_{ol} n_{tl} - n_2 n_{ol} n_{th} - n_3 n_{oh} n_{tl} + n_4 n_{oh} n_{th}}{m n \sqrt{n_{oh} n_{ol} n_{th} n_{tl}}} \quad (2)$$

式中  $n_1, n_2, n_3, n_4$  分别为  $n_{ol} n_{tl}, n_{ol} n_{th}, n_{oh} n_{tl}, n_{oh} n_{th}$  出现的频数。

假设目标图像  $I$  中存在直线图像特征,如图 1(d)所示;定义直线宽度  $a$  和直线倾角  $\alpha$  为该图像特征的特征参数,其中,求解  $\alpha$  是关键。易设计  $\alpha = 90^\circ$  的直线特征模板图像  $T$ ,如图 1(a)所示。

通常情况下,如图 1(b)所示,根据(2)式,有

$$\begin{cases} n_{oh} = \frac{a}{\sin \alpha} n \\ n_{th} = c n \\ n_{ol} = m n - \frac{a}{\sin \alpha} n \\ n_{tl} = m n - c n \end{cases}, \quad \begin{cases} n_1 = n_1 \\ n_2 = n_{oh} - n_1 \\ n_3 = n_{th} - n_1 \\ n_4 = m n - n_1 - n_2 - n_3 \end{cases}.$$

为简化问题,要求模板图像只进行  $x$  向一维匹配(假设  $y = k$ ),用  $z(x)$  表示  $C(x, k)$ ,则有

$$z_1(x) = \frac{m}{n \sqrt{\frac{ac}{\sin \alpha} \left( m - \frac{a}{\sin \alpha} \right) (m - c)}} n_1 - \frac{ac}{\sin \alpha \sqrt{\frac{ac}{\sin \alpha} \left( m - \frac{a}{\sin \alpha} \right) (m - c)}} \quad (3)$$

通过适当建立坐标系,可简化  $n_1$ 。如图 1(b)所示,若将坐标原点建立在图像特征角点处,有

$$n_1 = \frac{1}{2} x^2 \tan \alpha. \quad \text{令 } \xi = \frac{\frac{a}{\sin \alpha} c}{\sqrt{\frac{ac}{\sin \alpha} \left( m - \frac{a}{\sin \alpha} \right) (m - c)}},$$

有

$$z_1(x) = \frac{1}{2} x^2 \tan \alpha \frac{m}{n} \frac{\sin \alpha}{ac} \xi - \xi. \quad (4)$$

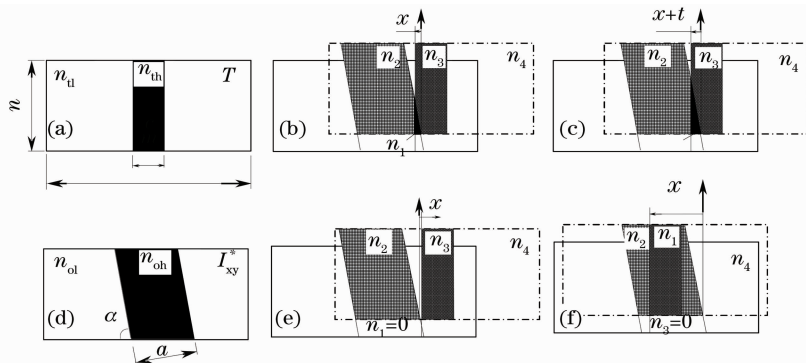


图 1 模板图像与目标图  
Fig. 1 Template image and the target image

需求解(4)式中的  $\xi$  及  $\sin \alpha/a$ 。

事实上,在匹配搜索中存在特殊情况  $n_1=0$ ,可以根据此类情形的模型求得  $\xi$ ,如图 1(e)所示,有

$$\begin{cases} n_{oh} = \frac{a}{\sin \alpha} n \\ n_{th} = cn \\ n_{ol} = mn - \frac{a}{\sin \alpha} n \\ n_{tl} = mn - cn \end{cases}, \begin{cases} n_1 = 0 \\ n_2 = n_{oh} \\ n_3 = n_{th} \\ n_4 = mn - n_{oh} - n_{th} \end{cases}$$

从而,有

$$z_2(x) = -\xi = -\frac{\frac{a}{\sin \alpha} c}{\sqrt{\frac{a}{\sin \alpha} c \left(m - \frac{a}{\sin \alpha}\right) (m - c)}} \quad (5)$$

在图 1(e)所示的情况下,通过(1)式进行相关匹配得到  $z_2(x)$ ,即可反解求得  $\xi$ 。在  $\xi, m$  和  $c$  已知的情况下,可依据(5)式求解关于  $\frac{a}{\sin \alpha}$  的一元一次方程,有

$$\left(\frac{a}{\sin \alpha}\right) = \frac{m(m-c)}{(c/\xi^2 + m - c)} \quad (6)$$

在很多应用情况下,若目标图像中特征参数  $a$  为已知,则依据(6)式即可求得  $\alpha$ 。

多数情况下  $a$  为未知。利用图 1(b),在任意匹配位置  $x_0$  及  $x_0+t$ ( $t$  为设定值),依据(4)式,有

$$\begin{cases} z_0 = \frac{1}{2} x_0^2 \tan \alpha \frac{m}{n} \frac{\sin \alpha}{ac} \xi - \xi \\ z_t = \frac{1}{2} (x_0 + t)^2 \tan \alpha \frac{m}{n} \frac{\sin \alpha}{ac} \xi - \xi \end{cases}$$

两式相除,变换为

$$x_0 = \frac{t \sqrt{\frac{z_0 + \xi}{z_t + \xi}}}{\left(1 - \sqrt{\frac{z_0 + \xi}{z_t + \xi}}\right)} \quad (7)$$

由已求得的  $x_0, \frac{a}{\sin \alpha}$  及  $\xi$ ,依据(4)式,有

$$\alpha = \arctan \left[ 2(z_0 + \xi) \frac{cn}{m\xi x_0^2} \frac{a}{\sin \alpha} \right] \quad (8)$$

从而得到  $\alpha$ 。

### 3 算法及讨论

综上可将直线特征测量方法概述如下:

1)设计模板图像,在特殊匹配模式  $n_1=0$  情况下,在直线特征目标区域进行匹配,得到相似函数值  $c_2$ ,即为  $z_2$ ,由(5)式可得  $\xi$ ;

2)根据(6)式求得  $a/\sin \alpha$ ;

3)用相同的模板图像,取适当的位置,记为  $x_0$ ,进行匹配,得到相似函数值  $c_0$ ,即为  $z_0$ ;

4)在  $x_0+t(t \geq 1)$  位置处进行匹配,得到相似函数值  $c_t$ ,即为  $z_t$ ;

5)在已知  $z_0, z_t$  以及  $t$  的情况下,依据(7)式,求得  $x_0$ ;

6)在已知  $z_0, \xi, a/\sin \alpha$  以及  $x_0$  的情况下,依据(8)式,求得直线特征参数  $\alpha$ ;

7)在已知  $a/\sin \alpha$  以及  $\alpha$  的情况下,求解  $a$ 。

在上述算法中,从原理上讲,应有  $z_2 = c_2, c_0 = z_0$  及  $c_t = z_t$ ( $z$  表示理论推导的相似函数, $c$  表示图像匹配值)。实际中,由于数字化图像对连续函数进行了离散化处理,导致在针对实际图像进行计算时,存在  $z_2 \approx c_2, c_0 \approx z_0$  及  $c_t \approx z_t$ 。

举例说明:制作具有  $a=81, \alpha=45^\circ$  直线特征的仿真图像  $I_{xy}^*$ ,作为目标图像,参见图 2;设计  $c=41$  的模板图像  $T$ 。另外,有  $m=361, n=101$ 。

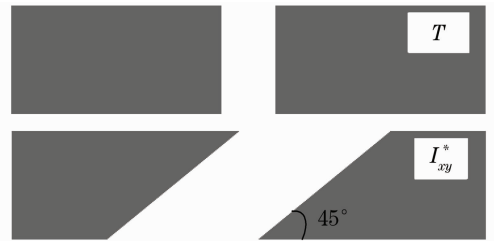


图 2 直线型模板仿真图像与目标仿真图像

Fig. 2 Simulating line shaped template image and the target image

利用上述已知参数,依据(4)式进行计算,可得  $z_1(i)$ ,结果如图 3 所示。针对图 2 中模板与目标图像进行 NCCO 一维匹配,可得  $c_1(i)$ 。

$z_1(i)$  与  $c_1(i)$  的对比证明了离散化图像导致了

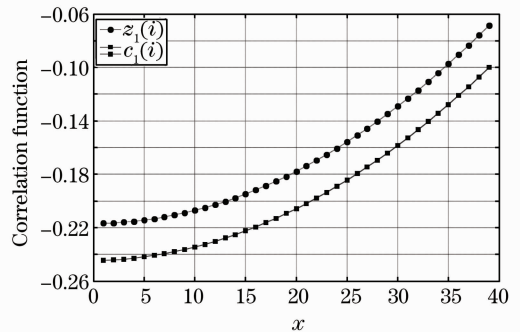


图 3  $z_1(i)$  与  $c_1(i)$  对比

Fig. 3 A contrast between  $z_1(i)$  and  $c_1(i)$

$c_0 < z_0$  及  $c_t < z_t$ 。且这种误差呈现近似比例特性。变换(5)式,可以得到  $\xi$  的几何含义,

$$\xi = \sqrt{\frac{n_{oh}}{mn - n_{oh}}} \sqrt{\frac{n_{th}}{mn - n_{th}}},$$

实际图像计算中,则有

$$\xi^* = \sqrt{\frac{n_{oh}^*}{mn - n_{oh}^*}} \sqrt{\frac{n_{th}}{mn - n_{th}}},$$

离散化图像将导致  $n_{oh}^* > n_{oh}$ , 从而  $\xi^* > \xi$ , 对照

$$\begin{cases} z_1(x) = -\xi \left( 1 - \frac{1}{2} x^2 \tan \alpha \frac{m}{n} \frac{\sin \alpha}{ac} \right) \\ c_1(x) = -\xi^* \left( 1 - \frac{1}{2} x^2 \tan \alpha \frac{m}{n} \frac{\sin \alpha}{ac} \right) \end{cases},$$

解释了图 3。

上述原因使得所述的直线特征测量方法存在对参数  $x_0$  及  $t$  的依赖性。例如,仿真图像直线特征真值为  $\alpha = 45^\circ$ 。图 4 表明,  $x_0$  一定时,测量精度随着  $t$  的增加而增加;  $x_t$  一定时,测量精度随着  $t$  的增加而增加。

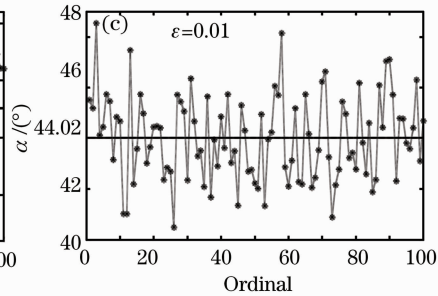
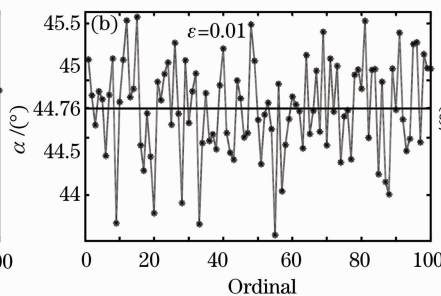
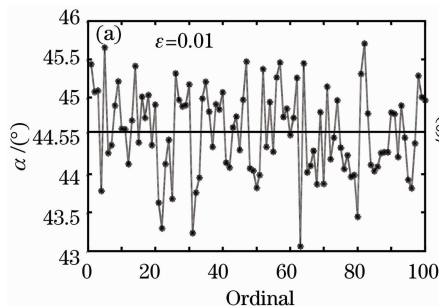


图 5 定位精度重复性实验。(a) 椒盐噪声; (b) 乘积噪声; (c) 高斯噪声

Fig. 5 Experimental results of positioning accuracy. (a) Salt and pepper noise; (b) speckle noise; (c) Gaussian white noise

使用本文所述的直线特征测量算法对上述 3 类含噪声仿真图像进行多次重复实验 ( $n=100$ ), 图 5 中给出了多次重复定位误差的结果及其平均值。由图 5 可知, 直线特征测量算法对椒盐噪声图像特征参数  $\alpha$  的测量正确度为  $0.45^\circ$ , 对乘积噪声的测量正确度为  $0.24^\circ$ , 对高斯噪声更为敏感, 测量正确度为  $0.98^\circ$ 。

## 5 实 验

塑料微流控芯片全自动微装配系统[图 6(a)]以“宏-微”结合模式对上片与下片进行精密对准操作<sup>[13]</sup>, 如图 6(b)所示。系统首先工作在低分辨率, 大视场下, 以使对准标记全貌, 提高效率; 而后, 为达到装配精度要求, 视觉系统则应工作在高分辨率、小视场下。两种情况都须对芯片上的十字型标记特征[图 6(c)、图 6(d)]进行精密定位。在“宏”操作中,

图 4 实验结果显示, 合理配置  $x_0$  及  $x_t$ , 可将测量精度提高近一个数量级。

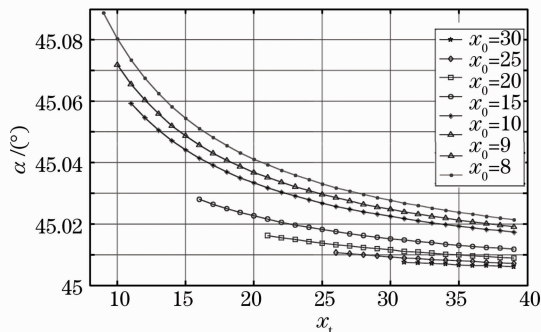


图 4 定位正确度与  $x_t$  的关系

Fig. 4 Relations between positioning accuracy and parameter  $x_t$

## 4 仿真实验

分别在如图 2 所示的目标图像中分别加入强度  $\epsilon = 0.01$  的高斯噪声、乘积性噪声、及椒盐噪声。绝大多数的实际图像要低于这种噪声强度。

效率优先, 兼顾精度。

可以采用 4 种方法对如图 6 所示的十字型图像特征进行宏定位:

- 1) Hough 变换: 通过边缘检测, 阈值化图像分割后利用 Hough 变换方法进行精密定位;
- 2) 经典图像匹配方法: 利用 NCCO 算子进行匹配搜索, 而后对模板图像进行旋转变换, 在一定区域内搜索匹配, 直至找到最大相似点;
- 3) 拟合方法: 通过边缘检测, 图像分割后在像平面空间对直线段进行拟合;
- 4) 本文所述方法。

Hough 变换和经典图像匹配方法计算量大, 实时性不好。相对而言, 拟合方法实时性略好, 但测量精度易受图像滤噪及特征分割影响。本文所述方法从本质上讲是对经典匹配方法在实时性上的改进算

法,将采用对比实验的方法检验该算法执行的实时性。在自动微装配系统上对本文方法与拟合方法进行实时性对比实验。用 $T_c$ 表示使用本文所述方法

完成一次直线特征定位所用时间;拟合方法用 $T_e$ 表示。实验结果如图 7 所示。相比拟合方法,本文的方法在实时性上要高出 2.5 倍。

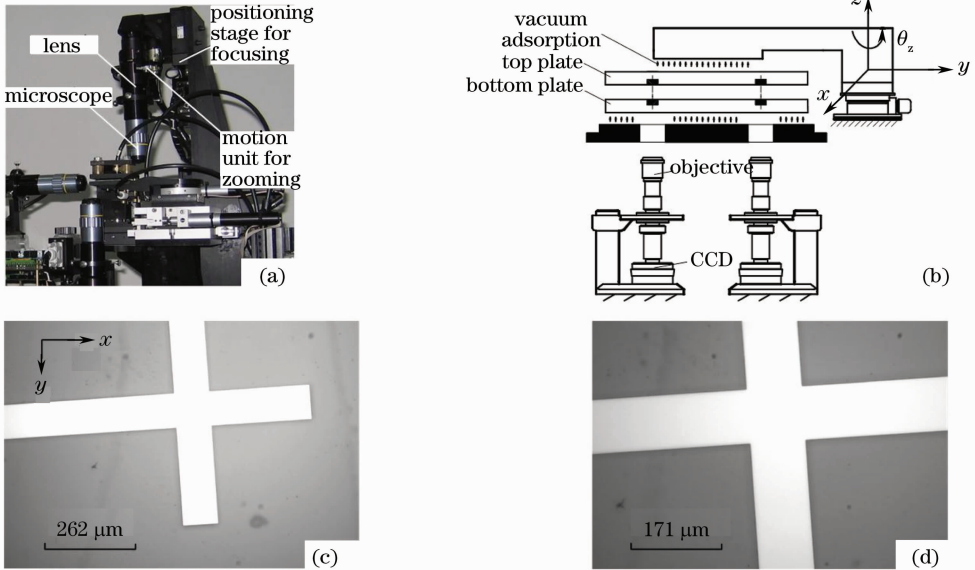


图 6 实验平台与显微图像

Fig. 6 Experimental work-bench and microscopic images

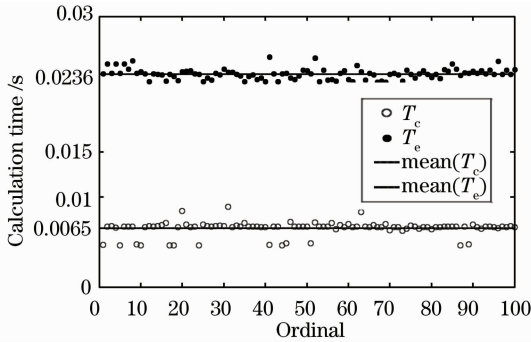


图 7 算法时间高效率实验

Fig. 7 Experimental results of time consumption in algorithm execution

## 6 结 论

推导并讨论了 NCCO 匹配搜索数学模型,欲解决直线图像特征测量实时性的问题,结论为

1)通过设计特殊模板,并利用直线特征的自身特点,从原理上推导并证明了求解直线型图像特征参数的计算公式,据此提出一种直线型图像特征的快速测量方法;

2)等噪声强度的仿真图像实验结果表明,直线特征倾角  $\alpha$  的测量正确度在  $0.24^\circ \sim 0.98^\circ$ ;

3)将测量算法应用于对准装配系统中对标记图像的粗定位,实测算法在实时性上要远优于传统模板匹配方法,甚至高于传统拟合方法约 2.5 倍。

## 参 考 文 献

- 1 S. Milan, H. Vaclav, B. Roger. Image Processing, Analysis, and Machine Vision [M]. USA: Thomson Learning, U. S. A., 1998. 622~623
- 2 Zhang Fumin, Qu Xinghua, Dai Jianfang, et al.. A method of precision evaluation for field large-scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2159~2163  
张福民, 曲兴华, 戴建芳等. 一种现场大尺寸测量精度的评价方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2159~2163
- 3 Zhao Lin, Jin Weiqi, Chen Yinan et al.. Blind restoration for defocus blurred image based on autocorrelation of derivative image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1703~1709  
赵琳, 金伟其, 陈翼男等. 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1703~1709
- 4 Tian Ying, Yuan Weiqi. Ear recognition based on fusion of scale invariant feature transform and ceometric feature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1485~1492  
田莹, 苑玮琪. 尺度不变特征与几何特征融合的人耳识别方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1485~1492
- 5 Li Bicheng, Peng Tianqiang, Peng Bo et al.. Intelligent Image Processing Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 239~266  
李弼成, 彭天强, 彭波等. 智能图像处理技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 239~266
- 6 J. Lingworth, J. Kittler. A survey of the Hough transform [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, **44**(1): 87~116
- 7 D. H. Ballard. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shape [J]. *Pattern Recognition*, 1981, **13**(2): 11~121
- 8 Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. Precision Measurement and Motion Measurement Based on Image [M]. Beijing: Science Press, 2002. 132~134  
于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 132~134

9 L. G. Brown. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computer Surveys*, 1992, **24**(4): 325~376

10 Wang Yansong, Ruan Qiuqi. An image orientation algorithm based on least squares correlative matching method [J]. *Journal on Communication*, 2003, **24**(9): 80~86  
王岩松, 阮秋琦. 基于最小二乘互相关算法的图像定位匹配研究 [J]. *通信学报*, 2003, **24**(9): 80~86

11 Sun Minglei, Zong Guanghua, Dong Dai *et al.*. A method of image resolution calibration for automatic microscopic zooming based on NCCO [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1117~1123  
孙明磊, 宗光华, 董代等. 基于 NCCO 的图像分辨率自动标

定方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1117~1123

12 Sun Minglei, Zong Guanghua, Bi Shusheng *et al.*. Characteristics of independence on image gray level in pattern matching algorithm and its application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 435~440  
孙明磊, 宗光华, 毕树生等. 标准互相关的灰度无关特性及其应用 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 435~440

13 Sun Minglei, Rong Zhang, Guohui Qiao *et al.*. An automatic microassembly workcell for PMMA microfluidic chip packaging [C]. *IEEE International Conference on Information and Automation*, Zhuhai/Macau, China, 2009, 449~454

· 广 告 ·



全球专业的激光晶体和非线性光学晶体制造商



CIOE2010 第十二届 中国国际光电博览会

2010年9月6-9日 深圳会展中心  
欢迎光临我们的展位: 1号馆411号

磁光晶体系列  
铽镱石榴石 (TGG)



产品系列

1. 非线性光学晶体
2. 激光晶体
3. 绿光、蓝光晶体组件
4. 声光和电光晶体
5. 双折射晶体
6. 闪烁晶体
7. 激光光学产品
8. 通讯光学产品
9. 红外光学产品
10. Q-开关、温控炉等



BBO Q-开关

BBO 普克尔盒的应用

- 1、高重复频率DPSS中Q 开关的理想选择
- 2、用于高重复频率再生放大系统的控制
- 3、腔倒空系统
- 4、削波



Q开关驱动源



超长 NdYVO4 晶体



光学产品