

# 基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法

马君国 黄孟俊

(国防科学技术大学自动目标识别实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 随着激光技术的发展,激光成像雷达在现代战争复杂战场环境中逐渐获得了广泛的应用,目前激光成像雷达自动目标识别技术已成为国内外研究的热点问题。提出了基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法,从激光成像雷达目标的距离像中提取低阶的 Zernike 矩、Hu 矩和中心矩构成组合矩特征,该特征对距离像噪声不敏感,应用径向基函数(RBF)神经网络对三种地面目标进行分类识别。实验结果表明,该算法与应用 Zernike 矩和 Hu 矩特征进行分类识别相比,对三种激光成像雷达地面目标的平均识别率在高载噪比(20 dB)下分别提高了 1.0% 和 3.7%;在低载噪比(10 dB)下分别提高了 11.8% 和 42.5%;当载噪比高于 17 dB 时,该算法的平均识别率达到 100%。因此该算法取得了比较好的识别效果。

**关键词** 激光成像雷达;信号处理;目标识别;组合矩;距离像

**中图分类号** TN957.52 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0609003

## Target Recognition Algorithm Based on Combination Moments for Laser Imaging Radar

Ma Junguo Huang Mengjun

(Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** With the development of laser technology, laser imaging radar gradually possesses vast application in complicated battlefield of modern warfare. At present automatic target recognition technology for laser imaging radar is a hot problem at home and abroad. Target recognition algorithm based on combination moments for laser imaging radar is put forward. Combination moments feature including lower-order Zernike moments, Hu moments and central moments is extracted from range image of laser imaging radar target, this feature is not sensitive to range image noise. Radial base function (RBF) neural network is used to recognize three kinds of ground targets. Experimental result shows that comparing this algorithm with using Zernike moments and Hu moments feature to recognize targets, the average recognition rate of three kinds of ground targets of laser imaging radar is raised by 1.0% and 3.7% separately under high carrier-to-noise ratio (CNR) (20 dB); the average recognition rate is raised by 11.8% and 42.5% separately under low CNR (10 dB); when CNR is higher than 17 dB, the average recognition rate of this algorithm is 100%. Therefore this algorithm gains good recognition effect.

**Key words** laser imaging radar; signal processing; target recognition; combination moment; range image

**OCIS codes** 100.5010; 100.6890; 100.3008; 100.4996

## 1 引 言

现代战争复杂的战场环境对精确制导武器提出了越来越高的要求,激光成像雷达以其特有的优势逐渐成为一种很有发展潜力的新型制导雷达<sup>[1]</sup>。激光成像雷达可以同时获得强度像和距离像,通过对

目标进行四维成像大大提高目标的信息量。强度像和距离像与目标表面的物理结构特性密切相关,反映了目标的本质特征,可以用来对目标进行分类识别<sup>[2,3]</sup>。

国内外对激光成像雷达自动目标识别进行了一

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61144011)资助课题。

作者简介: 马君国(1970—),男,博士,副研究员,主要从事激光成像雷达信息处理与目标识别等方面的研究。

E-mail: majunguo@sina.com

些研究,Green<sup>[4]</sup>利用广义似然比检测器(GLRT)和接收机工作特征(ROC)对包含未知目标和背景参数下的三维相干激光雷达距离像进行了检测和识别。Holmes等<sup>[5]</sup>从激光雷达距离像中提取多尺度的几何特征,利用基于模型和特征的混合分类器对三类目标进行识别。Perona等<sup>[6]</sup>利用最大平均相关高度(MACH)滤波器和距离分类相关滤波器(DCCF)对坐标变换后的激光雷达目标距离像和强度像进行识别。Pal等<sup>[7]</sup>提出从激光雷达目标强度像的伴随矩阵中提取相关度、矩、对比度、熵、均值和标准差等13个特征,应用随机选择特征的k-nn分类器和改进的多层感知器(MLP)网络两种方法对激光雷达目标进行识别。Armbruster<sup>[8]</sup>比较了常规的模型匹配方法(即确定性的模型匹配方法)和基于贝叶斯假设检验的概率技术(即概率模型匹配方法)对军用车目标距离像的分类性能,实验结果表明,最佳的分类结果是需要目标分割的概率模型匹配方法。Soliday等<sup>[9]</sup>将从目标距离像中提取的几何特征和从强度像中提取的反射系数特征进行特征层融合,然后利用混合的模糊——神经网络分类器进行识别。Koksal等<sup>[10]</sup>提出了一种基于统计模型的激光成像雷达目标识别方法,应用边缘跟踪提取目标距离像的轮廓边缘作为特征,然后建立特征的统计模型,通过与目标模型库作匹配实现对军用车目标的识别。Sun等<sup>[11]</sup>提出利用MACH滤波器对激光成像雷达仿真距离像进行噪声抑制高斯噪声,利用DCCF对未知目标进行分类识别。

本文从激光成像雷达目标的距离像中提取低阶的Zernike矩、Hu矩和中心矩构成组合矩特征,Zernike矩是一组正交矩,Hu矩具有平移不变性、旋转不变性以及比例不变性,中心矩具有平移不变性和比例不变性<sup>[12]</sup>,利用径向基函数(RBF)神经网络实现对三种地面目标的分类识别。

## 2 提取组合矩特征

### 2.1 中心矩

将激光成像雷达目标距离像看作一幅图像,则 $p+q$ 阶原点矩 $M_{pq}$ 的大小定义为

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad (1)$$

$p+q$ 阶中心矩 $\mu_{pq}$ 的大小定义为

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy, \quad (2)$$

式中 $\bar{x}, \bar{y}$ 表示图像的重心, $\bar{x} = M_{10}/M_{00}, \bar{y} = M_{01}/M_{00}, p, q = 0, 1, 2, \dots$ 。中心矩具有平移不变性和比例不变性。

### 2.2 Hu矩

Hu<sup>[13]</sup>于1962年证明了有关矩的平移不变性、旋转不变性以及比例不变性等性质,具体给出了7个不变矩的算法。将激光成像雷达目标距离像看作一幅图像,可以提取Hu矩特征,该特征具有平移不变性、旋转不变性以及比例不变性。距离像的7个Hu矩特征具体表达式为

$$M_1 = \eta_{20} + \eta_{02}, \quad (3)$$

$$M_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \quad (4)$$

$$M_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2, \quad (5)$$

$$M_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2, \quad (6)$$

$$M_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \times [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2], \quad (7)$$

$$M_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}), \quad (8)$$

$$M_7 = (3\eta_{12} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \times [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2], \quad (9)$$

式中 $\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r}, r = \frac{p+q+2}{2}$ 。

### 2.3 Zernike矩

将激光成像雷达目标距离像看作一幅图像,可以提取Zernike矩特征。Teague<sup>[14]</sup>基于正交多项式的思想,构造了一组正交矩,克服了标准矩的一些缺陷。Zernike矩即为其中一种,实质上,它是一种将图像函数变换到一组正交基函数上的映射。

$n$ 阶Zernike矩的大小定义为

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) [V_{nm}(x, y)]^* dx dy, \quad (10)$$

式中 $\{V_{nm}(x, y)\}$ 是一组正交多项式集合,图像 $f(x, y)$ 的Zernike矩是该图像在此多项式上的投影,而这组多项式集合 $\{V_{nm}(x, y)\}$ 在单位圆内集合 $\{x^2 + y^2 \leq 1\}$ 是正交的。即:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(x, y) V_{pq}(x, y) dx dy = \begin{cases} \frac{\pi}{n+1}, & n = p, m = q \\ 1, & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $V_{nm}(x, y)$ 的形式为

$$V_m(x, y) = R_m(x, y) \exp[jm \arctan(y/x)], \quad (12)$$

式中  $n$  是正整数或零;  $m$  是正或负整数, 但要满足  $n - |m|$  为偶数;  $R_m(x, y)$  是径向多项式, 其表示式为

$$R_m(x, y) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \times \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \times (x^2 + y^2)^{n/2-s}. \quad (13)$$

为了计算一幅给定图像的 Zernike 矩, 必须将图像的重心平移到坐标原点, 将图像像素点映射到单位圆内<sup>[15]</sup>, 即集合  $\{x^2 + y^2 \leq 1\}$ 。在计算过程中, 落在单位圆外的点不参与计算。对于图像旋转, Zernike 矩的幅值将保持不变; Zernike 矩是一组正交矩, 并能够方便地构造任意的高阶矩, 高阶矩包含了图像的更多信息。

## 2.4 组合矩特征

矩特征反映了目标距离像相对于质心的统计分布情况, 由于激光成像雷达地面目标距离像噪声抑制方法通常不能完全去除噪声, 而高阶矩对噪声比较敏感, 可以由若干种低阶矩构成组合矩特征。组合矩特征包括低阶的 Zernike 矩、Hu 矩和中心矩, Zernike 矩是一组正交矩, Hu 矩具有平移不变性、旋转不变性以及比例不变性, 中心矩具有平移不变性和比例不变性, 组合矩特征可以发挥这三种矩的优势, 对激光成像雷达地面目标距离像噪声不敏感, 极大地抑制了目标距离像噪声的影响。

## 3 应用 RBF 神经网络进行分类识别

从激光成像雷达目标的距离像提取出低阶的 Zernike 矩、Hu 矩和中心矩构成组合矩特征后, 可以应用 RBF 神经网络进行分类识别。

假设待分类的空间目标为  $I$  类, 每类目标的特征向量为  $d$  维, 在神经网络训练阶段每类目标的特征向量样本数分别为  $N_1, N_2, \dots, N_I$ , 记所有的特征向量样本为  $\mathbf{x}_i, i = 1, 2, \dots, N, N = N_1 + N_2 + \dots + N_I$ , 即  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_1}$  为第一类目标的特征向量,  $\mathbf{x}_{N_1+1}, \mathbf{x}_{N_1+2}, \dots, \mathbf{x}_{N_1+N_2}$  为第二类目标的特征向量, 以此类推。RBF 神经网络示意图如图 1 所示, 输入层节点数为  $d$ , 隐层节点数为  $M$ , 输出层节点数为  $I$ , 输入层到隐层的权值为 1, 隐层第  $j$  个节点至输出层第  $k$  个节点的权值为  $w_{jk}$ , 隐层节点的 RBF 函数为

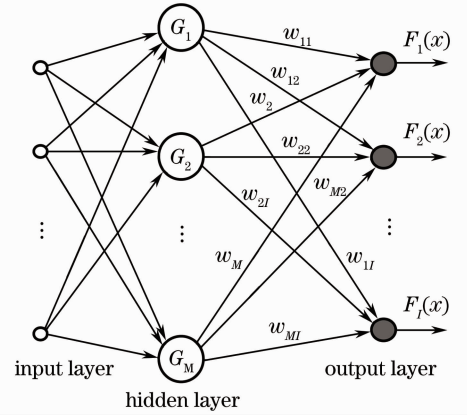


图 1 RBF 神经网络示意图

Fig. 1 Diagram of RBF neural network

$$G_j(\mathbf{x}, \mathbf{s}_j) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_j^2} \|\mathbf{x} - \mathbf{s}_j\|^2\right), \quad (14)$$

式中  $\mathbf{s}_j, \sigma_j^2$  分别为隐层第  $j$  个节点上 RBF 的中心向量和方差,  $j = 1, 2, \dots, M, \mathbf{s}_j, \sigma_j^2$  可以通过  $K$  均值聚类算法获得。RBF 神经网络的输出误差为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^I \sum_{i=1}^N \left[ d_{ik} - \sum_{j=1}^M w_{jk} \times \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_j^2} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|^2\right) \right]^2, \quad (15)$$

式中  $d_{ik}$  为期望输出, 由  $d_{ik}$  构成期望输出矩阵为

$$\mathbf{D} = [d_{ik}]_{N \times I} = \begin{bmatrix} \underbrace{1 \cdots 1}_{N_1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N_2} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N_I} \\ \underbrace{0 \cdots 0}_{N_1} & \underbrace{1 \cdots 1}_{N_2} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N_I} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \underbrace{0 \cdots 0}_{N_1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N_2} & \underbrace{1 \cdots 1}_{N_I} \end{bmatrix}^T, \quad (16)$$

由最小二乘法可以得到权值矩阵为

$$\mathbf{W} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{D}, \quad (17)$$

式中  $\mathbf{W} = [w_{jk}]_{M \times I}$ , 隐层节点输出矩阵  $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{N \times M}, r_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_j^2} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|^2\right)$ 。

在测试阶段, 令  $\mathbf{x}$  为待测试的特征向量, 则隐层节点输出向量为  $\mathbf{r} = [r_j]_{M \times 1}, r_j = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_j^2} \|\mathbf{x} - \mathbf{s}_j\|^2\right)$ , RBF 神经网络的输出向量为

$$\mathbf{O} = \mathbf{W}^T \mathbf{r}. \quad (18)$$

## 4 数值仿真及分析

通过计算机仿真得到三种地面目标(坦克 A、坦克 B 和装甲车 C)的激光成像雷达距离像, 目标中心和激光成像雷达之间作用距离为 420 m, 俯仰角为

30°,方位角为 0.5°~180°,距离像分辨率为 128 pixel×128 pixel,每个距离像的方位角间隔为 0.5°,每种目标的距离像为 360 个,将奇数序号的距离像作为训练样本,偶数序号的距离像作为测试样本。图 2~4 分别给出了方位角为 135°、没有噪声时的三种地面目标的激光成像雷达距离像。

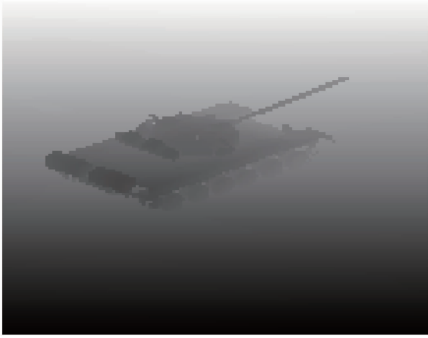


图 2 坦克 A 的激光成像雷达距离像

Fig. 2 Laser imaging radar range image of tank A

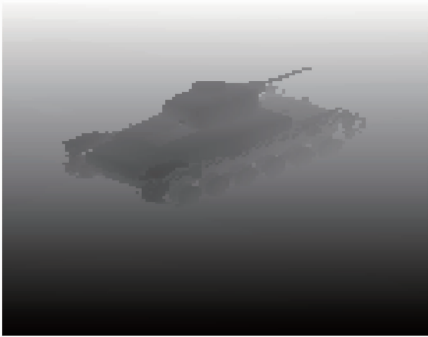


图 3 坦克 B 的激光成像雷达距离像

Fig. 3 Laser imaging radar range image of tank B



图 4 装甲车 C 的激光成像雷达距离像

Fig. 4 Laser imaging radar range image of armored vehicle C

图 5 给出了分别应用 Zernike 矩、Hu 矩和组合矩特征进行目标识别时,三种激光成像雷达地面目标不同载噪比(CNR)下的平均识别率,采用 RBF 神经网络作为分类器,Zernike 矩包括 19 个特征  $\{A_{00}, A_{20}, A_{22}, A_{31}, A_{33}, A_{40}, A_{42}, A_{44}, A_{51}, A_{53}, A_{55},$

$A_{60}, A_{62}, A_{64}, A_{66}, A_{71}, A_{73}, A_{75}, A_{77}\}$ ;Hu 矩包括 7 个特征  $\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7\}$ ;组合矩由 9 个 Zernike 矩特征  $\{A_{00}, A_{11}, A_{20}, A_{22}, A_{31}, A_{33}, A_{40}, A_{42}, A_{44}\}$ 、2 个 Hu 矩特征  $\{M_1, M_2\}$  和 8 个中心矩特征  $\{\mu_{00}, \mu_{11}, \mu_{02}, \mu_{20}, \mu_{30}, \mu_{03}, \mu_{12}, \mu_{21}\}$  构成,特征维数为 19。从图 5 可以看出,基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法与应用 Zernike 矩和 Hu 矩特征进行分类识别方法相比,对三种激光成像雷达地面目标的平均识别率在高载噪比(20 dB)下分别提高了 1.0%和 3.7%;尽管噪声的影响使得组合矩特征具有不确定性,但是算法在高载噪比(20 dB)下取得了 100%的平均识别率,因此算法识别结果的不确定度为 0%;在低载噪比(10 dB)下分别提高了 11.8%和 42.5%。由于矩特征对于噪声比较敏感,随着载噪比的降低,应用三种特征进行目标识别的平均识别率逐步降低,其中应用 Hu 矩进行目标识别的平均识别率下降得最为显著,这是由于 Hu 矩的 7 个特征中含有高阶矩;应用 Zernike 矩进行目标识别的平均识别率高于应用 Hu 矩进行目标识别的平均识别率,这是由于 Zernike 矩特征是一组正交矩;因为组合矩特征由低阶的 Zernike 矩、Hu 矩和中心矩构成,能够发挥这三种矩的优势,对激光成像雷达地面目标距离像噪声不敏感,所以基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法的平均识别率明显高于应用 Zernike 矩和 Hu 矩进行目标识别的平均识别率。当载噪比高于 17 dB 时,该算法的平均识别率可以达到 100%,取得了比较好的识别效果。

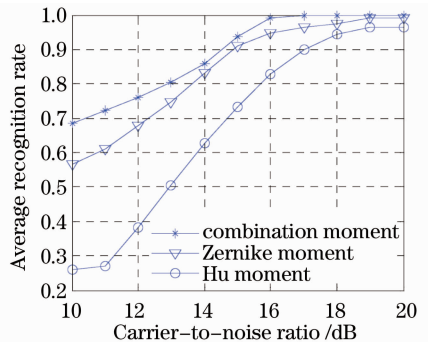


图 5 不同载噪比下的平均识别率

Fig. 5 Average recognition rate under different CNR

## 5 结 论

提出了基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法,从激光成像雷达目标的距离像中提取了低阶的 Zernike 矩、Hu 矩和中心矩构成组合矩特征,Zernike 矩是一组正交矩,Hu 矩具有平移不变性、

旋转不变性以及比例不变性,中心矩具有平移不变性和比例不变性,在此基础上应用 RBF 神经网络对三种地面目标进行分类识别。该算法取得了比较高的识别率,而且特征维数少,识别时间短,能够满足弹载实现的需求,具有一定的应用前景。如何对组合矩特征进行改进,实现在低载噪比下仍然获得比较高的识别率,需要在以后的研究中进行解决。

### 参 考 文 献

- 1 Li Xiaofeng, Xu Jun, Luo Jijun *et al.*. Sequential detection of targets in laser active imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908007  
李晓峰,徐军,罗积军等.基于序贯检验的激光主动成像目标探测方法[J].中国激光,2011,**38**(9): 0908007
- 2 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo *et al.*. A novel method for lidar target orientation estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0414002  
郭裕兰,鲁敏,谭志国等.一种新的激光雷达目标姿态估计算法[J].中国激光,2011,**38**(4): 0414002
- 3 Dong Jihui, Hu Qiquan, Sun Dongsong *et al.*. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109002  
董吉辉,胡企铨,孙东松等.空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J].中国激光,2011,**38**(1): 0109002
- 4 T. J. Green, Jr.. Target recognition theory for laser radar imaging[C]. *SPIE*, 1997, **3070**: 200~212
- 5 Q. A. Holmes, X. Zhang, D. Zhao. Multi-resolution surface feature analysis for automatic target identification based on laser radar images [C]. Proceedings of International conference on

- Image Processing, 1997, **3**: 468~471
- 6 M. T. Perona, Abhijit Mahalanobis. Lidar automatic target recognition using correlation filters [C]. *SPIE*, 1999, **3718**: 388~396
- 7 N. R. Pal, Tobias C. Cahoon, Jim C. Bezdek *et al.*. A new approach to target recognition for Lidar data[J]. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 2001, **9**(1): 44~52
- 8 W. Armbruster. Comparison of deterministic and probabilistic model matching techniques for laser radar target recognition[C]. *SPIE*, 2005, **5807**: 233~240
- 9 S. W. Soliday, M. T. Perona, D. G. McCauley *et al.*. Hybrid fuzzy-neural classifier for feature level data fusion in Lidar autonomous target recognition[C]. *SPIE*, 2001, **4379**: 66~77
- 10 A. E. Koksals, J. H. Shapiro, W. M. Wells. Model-based object recognition using laser radar range imagery[C]. *SPIE*, 1999, **3718**: 256~266
- 11 Jianfeng Sun, Wei Lu, Qi Li *et al.*. Correlation target recognition for laser radar[C]. *SPIE*, 2006, **6027**: 1~7
- 12 Hu Haitao, Ping Ziliang, Wu Bin. Quick algorithm of image moments with rotational invariance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 394~398  
胡海涛,平子良,吴斌.具有旋转不变性的图像矩的快速算法[J].光学学报,2010,**30**(3): 394~398
- 13 M. K. Hu. Visual pattern recognition by moment invariant[J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1962, **8**(2): 179~187
- 14 M. Teague. Image analysis via the general theory moments[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(8): 920~930
- 15 Fu Xiang, Zeng Jiexian. A novel image retrieval method based on interest points matching and distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 774~778  
符祥,曾接贤.基于兴趣点匹配和空间分布的图像检索方法[J].中国激光,2010,**37**(3): 774~778

栏目编辑:李文喆