

# 彩色图像特征提取的视觉感知理论与参数选取

王蒙军 阳路 王霞 刘剑飞

(河北工业大学信息工程学院, 天津 300401)

**摘要** 彩色空间信息更加有利于最佳特征向量的提取,为了获得彩色空间中脉冲耦合神经网络(PCNN)参数,通过模拟视觉感知系统感知彩色信息的过程,利用 PCNN 分别在 RGB 模型和 HSV 模型的颜色空间中求取熵序列作为分类特征,通过实验选取最佳 PCNN 参数。针对国家标准彩色道路交通标志图像库 GB5768-1999 中 43 个警告标志,42 个禁令标志,29 个指示标志进行实验,结果表明,参数为  $\alpha_L=1, \alpha_F=0.1, \alpha_E=1, V_L=0.2, V_F=0.5, V_E=27, \beta=0.1$ , 选取  $N=50$  时,蓝色分量中所得的熵序列大类分类效果最佳。RGB 模型中蓝色分量能够充分反应交通标志的彩色分类信息,所提取的熵序列向量能够明显区分三个大类,优于传统将彩色图像转换成灰度图像的处理方法。

**关键词** 图像处理; 交通标志; 彩色空间; 脉冲耦合神经网络; 熵序列

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s109005

## Color Images Feature Extracting Based on Visual Perception and Parameters Setting

Wang Mengjun Yang Lu Wang Xia Liu Jianfei

(School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract** Optimal feature vector can be extracted in color image space. To acquire optimal parameters of pulse coupled neural network (PCNN) for color image space, color image processing are carried out by simulating visual perception of mammal. Entropy sequence of PCNN is calculated as feature vector to classify the traffic signs in RGB and HSV color space. Optimal parameters of PCNN are acquired through experiments. Experiments are carried out in GB5768-1999 of standard traffic signs image database. Experimental results show that the maximum inter-class distance value is acquired among 43 warning signs, 42 prohibition signs, and 29 instruction signs based on the entropy sequence of PCNN in blue color space while the optimal parameters of PCNN are  $\alpha_L=1, \alpha_F=0.1, \alpha_E=1, V_L=0.2, V_F=0.5, V_E=27, \beta=0.1$ , and  $N=50$  iterations. Blue component of the RGB model can fully reflect the color characteristics of traffic signs, entropy sequence of PCNN can be used as the vector sequences to distinguish three categories, superior to conventional color image into a grayscale image processing methods.

**Key words** image processing; traffic signs; color space; pulse coupled neural network; entropy sequence

**OCIS codes** 100.1960; 100.4996; 150.4065; 150.1708

## 1 引言

作为模拟动物视觉感知特性的脉冲耦合神经网络(PCNN),很多研究工作者都证明了其在形成图像纹理形状特征方面有独特优势<sup>[1-2]</sup>。研究者在采用 PCNN 分析处理图像过程中,为了简化模型以及去除 PCNN 理论基础限制,研究人员只采用 PCNN 模型处理二维图像数据,均将彩色图像从 RGB 或 HSV 彩色空间中转换成灰度图像,进而提取特征,

建立特征库<sup>[3-4]</sup>,这就导致图像的彩色信息没有得到充分利用。

作为辅助驾驶与无人驾驶智能巡航系统中的关键技术,道路交通标志自动识别(TSR)既是交通安全的提示信息,也是自动驾驶控制系统的引导信息<sup>[5]</sup>。国标交通标志的设置过程中,充分考虑了人眼视觉系统的色彩感知特性,在 230 m 视距下,视觉系统感知的颜色以黄色最明显,再次是白、红、蓝、

收稿日期: 2013-09-15; 收到修改稿日期: 2013-11-12

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究基金重点项目(ZD20131043)

作者简介: 王蒙军(1978-),男,博士,副教授,主要从事机器视觉、光电信息检测与处理、光谱分析等方面的研究。

E-mail: wangmengjun@hebut.edu.cn

绿色等。从心理效果上来看,红色的视觉刺激最强,使人产生危险感,常用于禁令标志;黄色比较醒目,能引起人们注意,常用于警告标志;蓝色、绿色含有沉静平和之意,有安全感,常用于指示标志。同时,对视觉的刺激也随着形状不同发生变化,形状越复杂,辨识程度越难,依次分别是:三角形、正方形、正五边形、圆形及正八边形等<sup>[6]</sup>。因此 GB5768-1999 规定的 43 个警告标志、42 个禁令标志、29 个指示标志的设计就综合了以上因素。警告标志多为顶角朝上的等边三角形,主色为黄色;禁令标志形状多为圆形,主色为红色;指示标志形状多为圆形或方形,主色为蓝色,中心图案为白色<sup>[7]</sup>。

交通标志识别的一个关键环节就是选取最佳的特征,因此特征应该充分利用交通标志的颜色与形状信息。研究工作者利用不同的色彩处理方法,包括颜色聚类、区域分割、彩色边缘检测等不同的方式,分别在 HSV 空间<sup>[8]</sup>, RGB 空间中进行<sup>[9-10]</sup>;研究人员也利用了不同的形状信息检测方法,包括 Hough 变换<sup>[11]</sup>、模板匹配<sup>[3,12]</sup>等方法,而综合利用颜色信息和形状信息将会使得识别的效果更加准确。

针对交通标志颜色选择的特殊性,结合人类视觉系统中色彩感知特性,提出采用模拟视觉感知系统的 PCNN 提取特征,利用 PCNN 提取彩色图像每个彩色分量的熵序列,将其作为图像纹理形状信息的描述,这样既充分利用了道路交通标志图像的形形状信息,又能够找到色彩区分的最佳色彩空间,利用 GB5768-1999 中的标准交通标志图像进行实验,选取 PCNN 的最佳参数,对比传统将彩色图像转换成灰度图像的方法,分析实验结果。

## 2 色彩视觉感知理论与 PCNN

人类视觉感知系统中的生理结构如图 1 所示,感

应不同色彩的主要是其中的锥状细胞和杆状细胞。



图 1 人眼视觉系统生理结构

Fig. 1 Physiological structure of the human visual system

锥状细胞有三种,能够感受不同波长的光,第一种敏感点在 665 nm 附近,主要感受红光;第二种敏感点在 535 nm 附近,主要感受绿光;第三种敏感点在 445 nm 附近,主要感受蓝光。杆状细胞只有一种,敏感颜色波长在蓝色和绿色之间。锥状细胞和杆状细胞所获得的 4 个不同强度的信号组合就是感知的颜色,RGB 彩色空间模型的主要依据就是这一彩色感知过程<sup>[13]</sup>。

Eckhorn<sup>[14-15]</sup>模拟哺乳动物大脑视觉皮层同步脉冲发放现象建立了 PCNN 神经元模型,充分考虑了视觉系统的脉冲捕获特性与同步发放特性,在图像处理领域取得广泛应用。构成 PCNN 的单个神经元模型如图 2 所示。(1)~(5)式用数学公式表示了单个神经元工作模型。

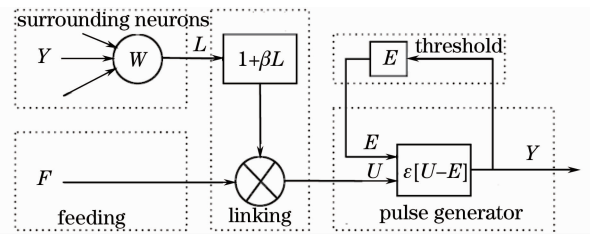


图 2 单个 PCNN 神经元模型

Fig. 2 Neuron of pulse coupled neural network (PCNN)

$$F_{ij}[n] = \exp(-\alpha_F)F_{ij}[n-1] + V_F \sum_{kl} M_{ijkl} Y_{ij}[n-1] + S_{ij}, \quad (1)$$

$$L_{ij}[n] = \exp(-\alpha_L)L_{ij}[n-1] + V_L \sum_{kl} W_{ijkl} Y_{ij}[n-1], \quad (2)$$

$$U_{ij}[n] = F_{ij}[n](1 + \beta L_{ij}[n]), \quad (3)$$

$$E_{ij}[n] = E_{ij}[n-1]\exp(-\alpha_E) + V_E Y_{ij}[n], \quad (4)$$

$$Y_{ij}[n] = \begin{cases} 1 & U_{ij}[n] > E_{ij}[n] \\ 0 & U_{ij}[n] \leq E_{ij}[n] \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $S_{ij}$  是外部输入项,图像处理应用中,每个神经元对应输入图像的第  $(i, j)$  个像素,  $S_{ij}$  是像素的灰度值;每个神经元接受像素灰度值的输入,进行迭代

点火,  $n$  为迭代次数,  $F_{ij}[n]$  是神经元的反馈输入项;  $L_{ij}[n]$  是神经元的线性输入项,  $U_{ij}[n]$  是神经元的内部活动项,  $E_{ij}[n]$  是神经元的动态门限,  $Y_{ij}[n]$  是

神经元的输出脉冲值。 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{W}$ 为 $F_{ij}[n]$ 、 $L_{ij}[n]$ 中各神经元之间的连接权值矩阵, $M_{ijkl}$ 、 $W_{ijkl}$ 分别为矩阵中的元素, $\beta$ 为神经元突触间的连接强度系数,用来调节当前像素和周围像素之间相互作用的大小, $\alpha_F$ 、 $\alpha_L$ 、 $\alpha_E$ 分别为 $F_{ij}[n]$ 、 $L_{ij}[n]$ 、 $E_{ij}[n]$ 中的衰减时间常数, $V_F$ 、 $V_L$ 、 $V_E$ 分别为 $F_{ij}[n]$ 、 $L_{ij}[n]$ 、 $E_{ij}[n]$ 中的固有电势。PCNN模型每次迭代点火时,神经元接受反馈输入 $F_{ij}[n]$ 和连接输入 $L_{ij}[n]$ 而形成内部活动项 $U_{ij}[n]$ ,通过与动态门限 $E_{ij}[n]$ 的判别比较,得到PCNN输出时序脉冲序列 $Y_{ij}[n]$ 值为0或1。

### 3 熵序列特征与 PCNN 参数选取

彩色图像模型包括 RGB、HSV、YCbCr 等,针对不同的应用,选取不同的彩色模型<sup>[16-17]</sup>。由于交通标志设计过程中特殊颜色的选取是依据视觉感知系统感受色彩的过程,而 PCNN 又是模拟视觉感知系统的信息处理过程,能够有效提取图像中的几何形状信息,所以研究采用 PCNN 在不同的彩色模型中能够有效提取最佳分类特征的方法。分别计算将 R、G、B 三个彩色分量以及 HSV 模型中三个分量作为输入数据得到熵序列形成特征向量,通过实验分析 PCNN 模型中各个关键参数的变化规律,选取最佳参数。

将每次迭代点火后 PCNN 的输出二值图像进行运算,求出所对应的熵值,得到的一维序列,就是原始图像所对应的熵序列,表示成(6)式,式中 $H_{\text{entropy}}$ 表示求二值图像的熵值

$$E_n[n] = H_{\text{entropy}}(Y[n]), \quad (6)$$

信息熵的计算如(7)式。

$$H(P) = -P_1 \log_2(P_1) - P_0 \log_2(P_0), \quad (7)$$

式中 $P_1$ 为二值图像出现1的概率, $P_0$ 为二值图像出现0的概率, $H(P)$ 为二值图像信息熵。实验中的道路交通标志均取自于国家标准 GB5768-1999(2号修改单修订后)《道路交通标志和标线》标准图像库中的图像,图像没有考虑噪声、颜色偏差的影响因素,这里选取了全部三大类114个标志,包括43个警告标志、42个禁令标志、29个指示标志,用以分析用于大类区别的最佳彩色空间。

实验将 R、G、B、H、S、V 6 个分量分别作为输入,利用 PCNN 计算熵序列进行分类,分析实验结果。PCNN 模型在提取熵序列特征时,对同一幅图像,不同参数对熵序列产生的影响不同,参数包括: $V_E$ 、 $V_F$ 、 $V_L$ 、 $\alpha_E$ 、 $\alpha_F$ 、 $\alpha_L$ 、 $\beta$ 。实验中分析不同参数不同值产生熵序列的收敛过程,将这一过程做出迭代收敛曲线图,结合计算量大小,选取最佳参数值,在分析单一参数对熵序列收敛的影响时,保证其他参数数值固定不变。图3~9分别给出了在处理同一个交通标志图像时 $V_E$ 、 $V_F$ 、 $V_L$ 、 $\alpha_E$ 、 $\alpha_F$ 、 $\alpha_L$ 、 $\beta$ 这7个参数不同情况下熵序列的收敛情况,图中横坐标为迭代次数 $N$ ,纵坐标为每次迭代所得二值图像的熵值。从图中可以看出,一维熵序列长度取决于迭代次数,每次迭代所得熵值代表二值图像中点火像素点个数与总像素点个数的比例关系。正确选取参数的值,可以保证每个循环周期内图像各像素点只点火一次,加快其点火频率,影响该序列的收敛速度。

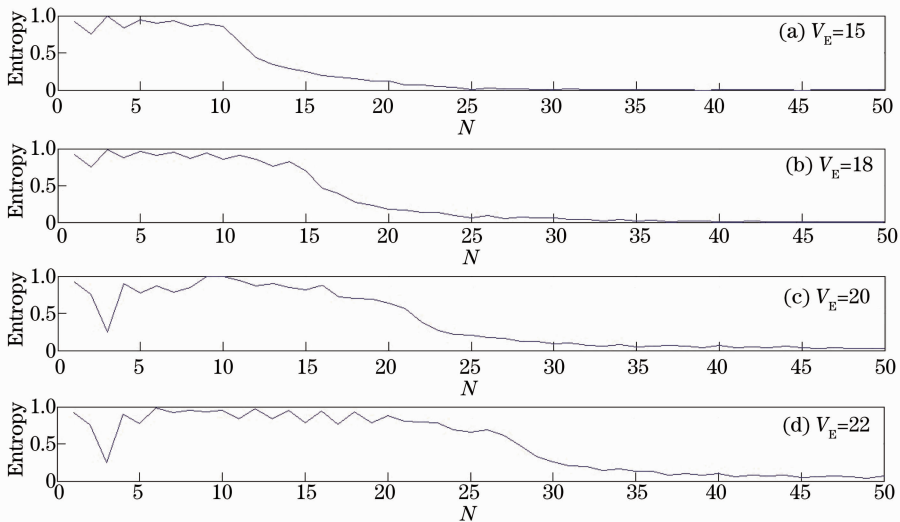


图3 不同固有电势 $V_E$ 的熵序列

Fig. 3 Chart of entropy sequence with different magnitude  $V_E$

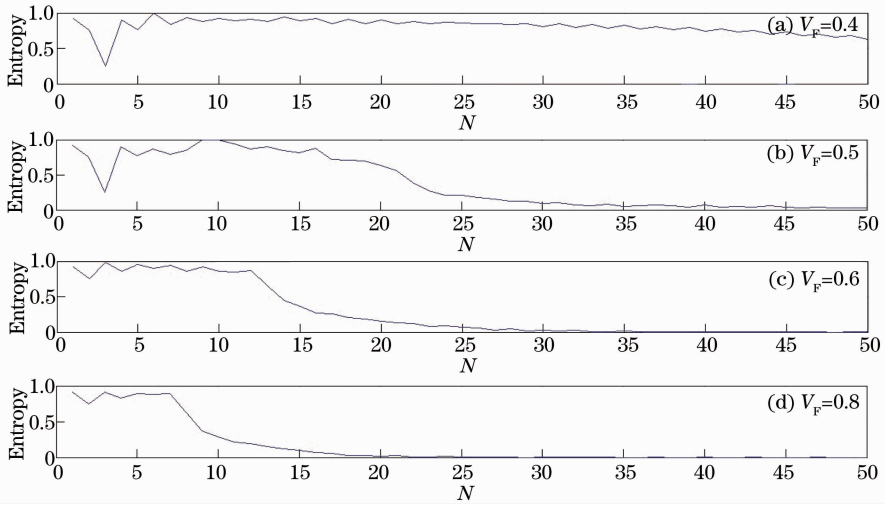


图 4 不同固有电势  $V_F$  的熵序列

Fig. 4 Chart of entropy sequence with different magnitude  $V_F$

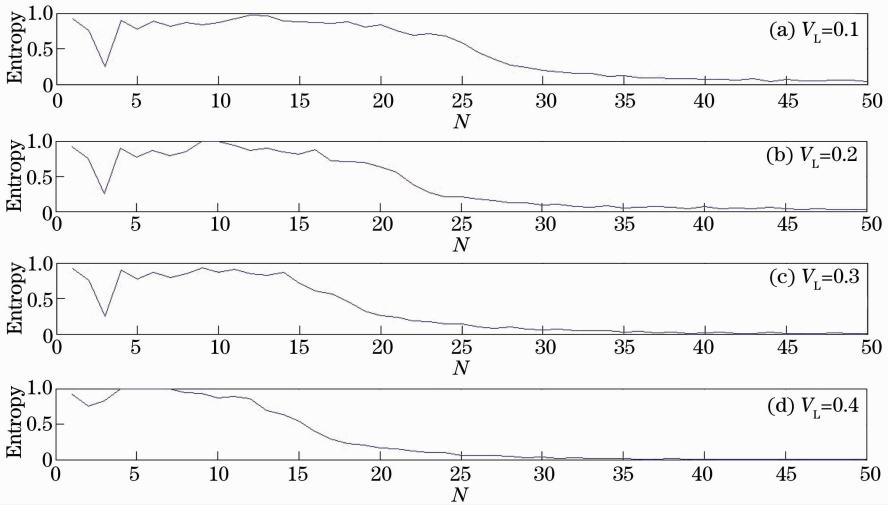


图 5 不同固有电势  $V_L$  的熵序列

Fig. 5 Chart of entropy sequence with different magnitude  $V_L$

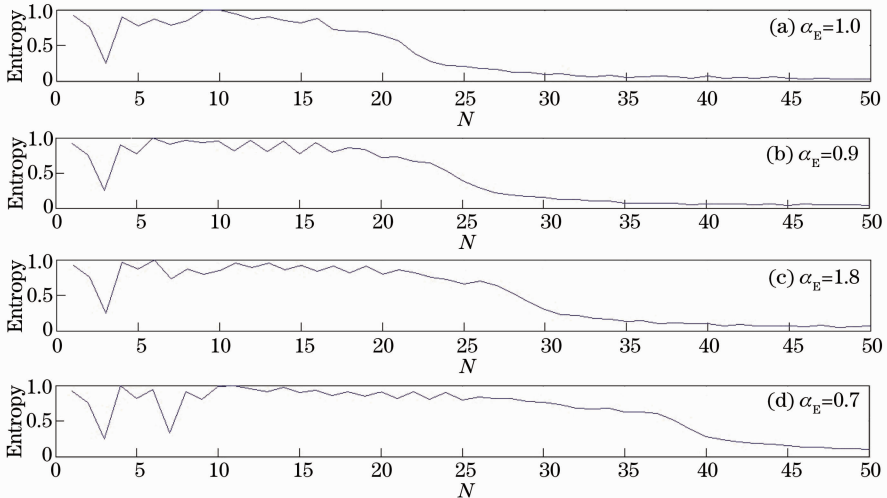


图 6 不同时间常数  $\alpha_E$  的熵序列值图

Fig. 6 Chart of entropy sequence with different time constants  $\alpha_E$

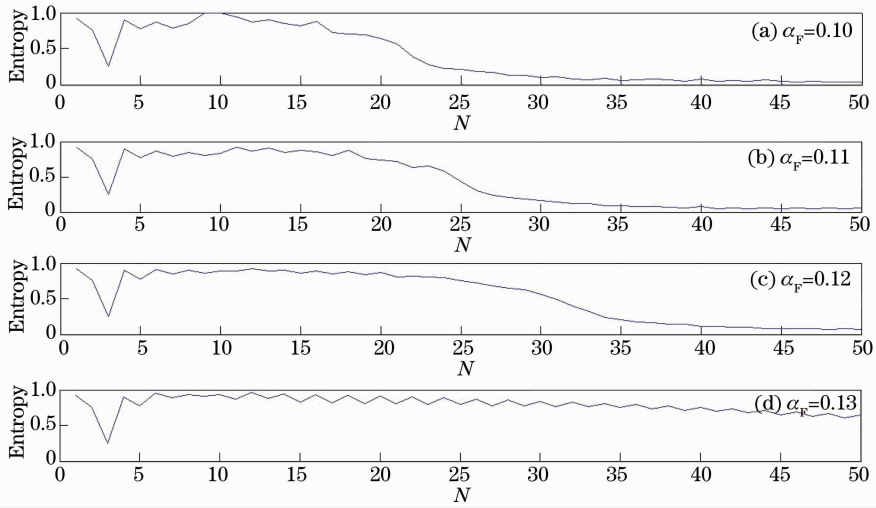


图 7 不同时间常数  $\alpha_F$  的熵序列

Fig. 7 Chart of entropy sequence with different time constants  $\alpha_F$

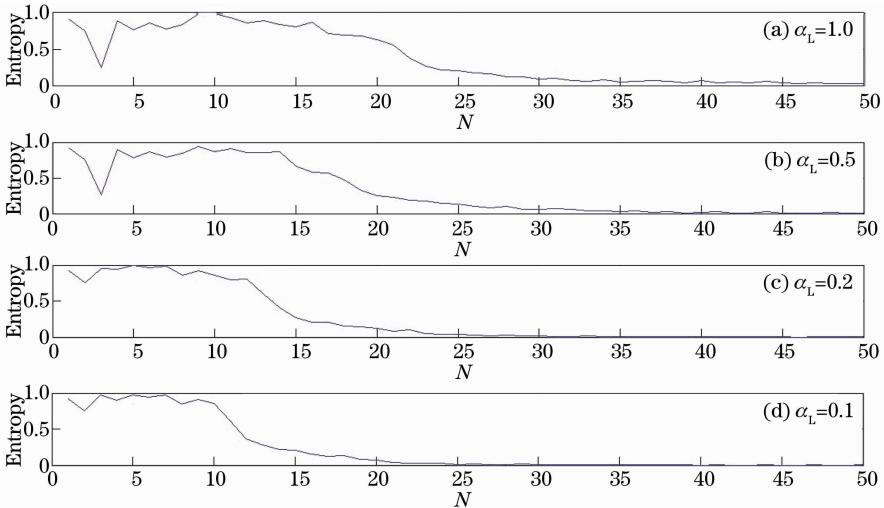


图 8 不同时间常数  $\alpha_L$  的熵序列

Fig. 8 Chart of entropy sequence with different time constants  $\alpha_L$

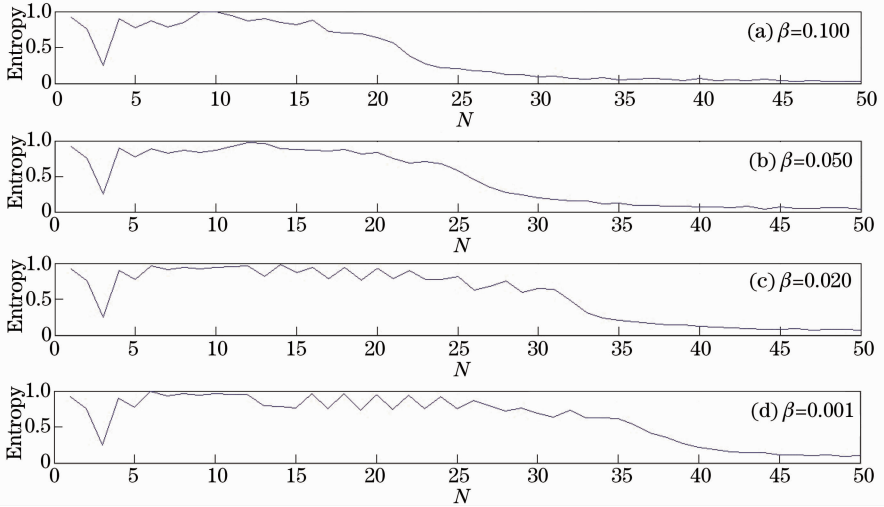


图 9 不同连接系数  $\beta$  的熵序列

Fig. 9 Chart of entropy sequence with different linking strength  $\beta$

参数取值与迭代次数选取的依据主要有两个,一方面要保证原始图像中的所有像素全部点火激活,另一方面又不能因为迭代次数过多而增加计算量,因此迭代次数的选取要综合这两方面的因素,根据实验中各个参数的收敛曲线图,可以知道各曲线收敛不再发生数值变化的迭代次数为 50,此时已能够满足以上两个因素的要求,因此选取  $N=50$ 。从曲线图上可以看出,当参数取值变化时,开始收敛的时刻不同,参数的取值同时要保证收敛时不增加计算量,因此确定求熵序列的 PCNN 网络的参数值为: $\alpha_L=1, \alpha_F=0.1, \alpha_E=1, V_L=0.2, V_F=0.5, V_E=27, \beta=0.1$ ,连接权值矩阵为:

$$M = W = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.25 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.2 \\ 0.25 & 1 & 0 & 1 & 0.25 \\ 0.2 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.25 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

#### 4 RGB 与 HSV 彩色分量中的分类结果

在确定计算熵序列的 PCNN 模型参数值以后,

将  $R, G, B, H, S, V$  6 个分量分别作为输入,用 PCNN 计算熵序列,以此分析哪个彩色分量中的熵序列能够将颜色特征明显的三大类道路交通标志区分出来。分别计算三大类 114 个常用交通标志的熵序列,然后计算任意两幅交通标志间熵序列的方差。图 10~15 分别给出了  $R, G, B, H, S, V$  6 个分量中任意两幅交通标志间熵序列方差的三维结果图。三维结果图中,横、纵坐标分别对应着按顺序排列的 114 个交通标志,其中 1~43 分别对应 43 个警告标志,44~85 分别对应 42 个禁令标志,86~114 分别对应 29 个指示标志。高度坐标表示两幅交通标志间熵序列方差值。例如空间坐标  $(24, 76, Z)$  表示第 24 位置上对应的警告标志图像与第 76 位置上对应的禁令标志图像之间熵序列的差异程度, $Z$  值越大,高度越高,差异度越大。实验中遍历了全部 114 幅交通标志图像来确定最佳的色彩分量。

图 10 为三大类 114 个交通标志在  $R$  通道下熵序列的分类结果。在  $R$  通道下三类标志熵序列并未呈现出较明显的类别特征,类内差异程度较小,类间差异程度参差不齐,不利于进行标志大类的区分。

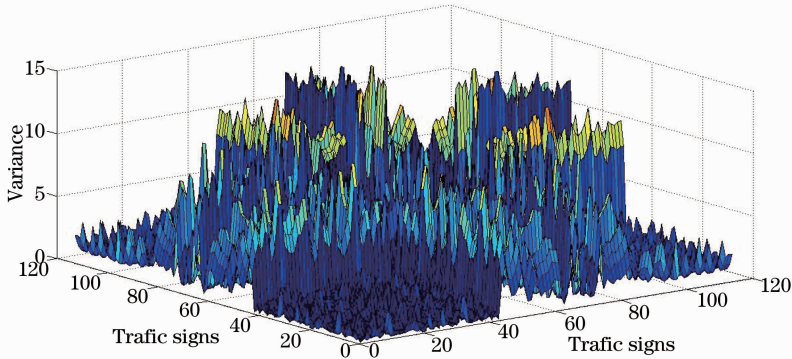


图 10  $R$  通道熵序列类间方差值

Fig. 10 Inter-classes variances of entropy sequence in  $R$  color space

图 11 为三大类 114 个交通标志在  $G$  通道下熵序列的分类结果。在  $G$  通道下的分类效果同样杂

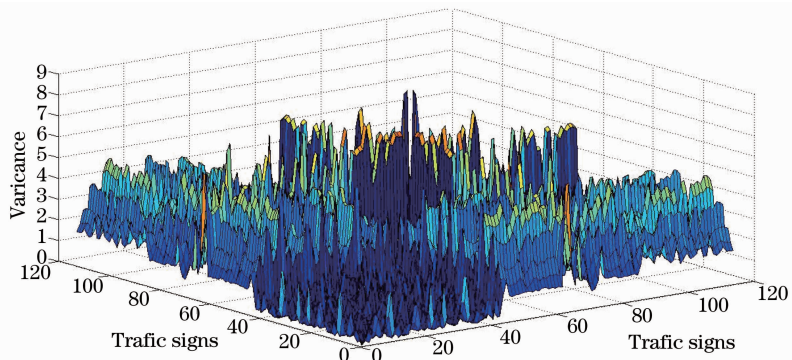


图 11  $G$  通道熵序列类间方差值

Fig. 11 Inter-classes variances of entropy sequence in  $G$  color space

乱无章,同样不适合用于对标志大类进行区分。

图 12 为三大类 114 个交通标志在  $B$  通道下熵序列的分类结果。从图中可以看出,三大类标志的

熵序列间差异具有较明显的分段特征,说明利用  $B$  通道下熵序列能够有效地进行大类分类。

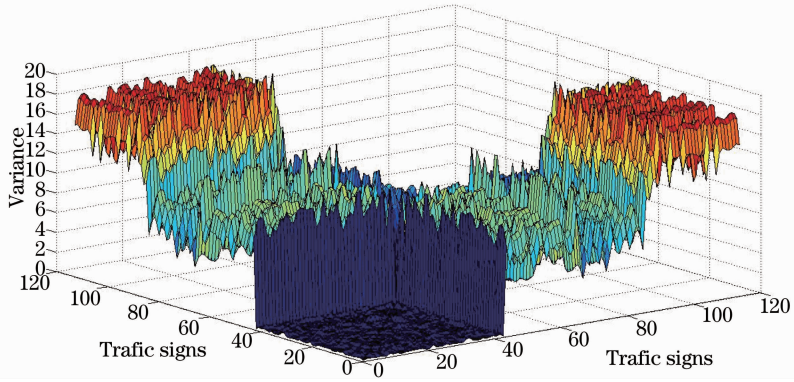


图 12  $B$  通道熵序列类间方差值

Fig. 12 Inter-classes variances of entropy sequence in  $B$  color space

图 13 为三大类 114 个交通标志在  $H$  通道下熵序列的分类结果。从图中可以看出,虽然三大类标志间差异也存在较为明显的分段特征,但在禁令标志段内存在两个较明显的低谷,这两个低谷对应禁

令标志内较为特殊的两个黑色标志,而在指示标志段内高度波动更为明显,所以若要利用该色彩通道下提取的熵序列进行大类区分还需要进一步细化类别或是配合其他分类信息进行识别。

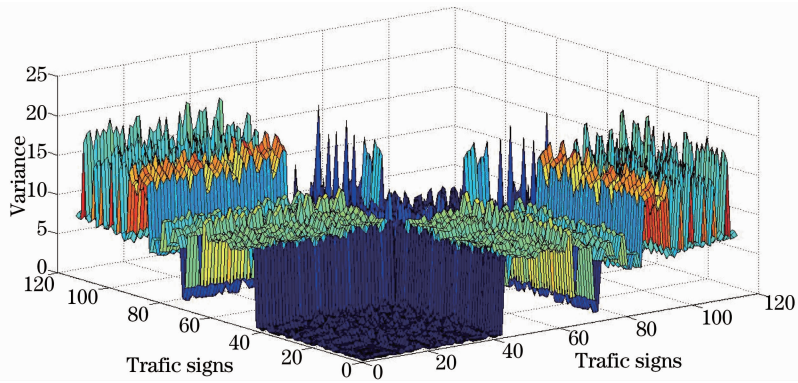


图 13  $H$  通道熵序列类间方差值

Fig. 13 Inter-classes variances of entropy sequence in  $H$  color space

图 14 为三大类 114 个交通标志在  $S$  通道下熵序列的分类结果。从图中可以看出,标志熵序列间

差异较为杂乱并且数值较小,所以并不适用于大类区分。

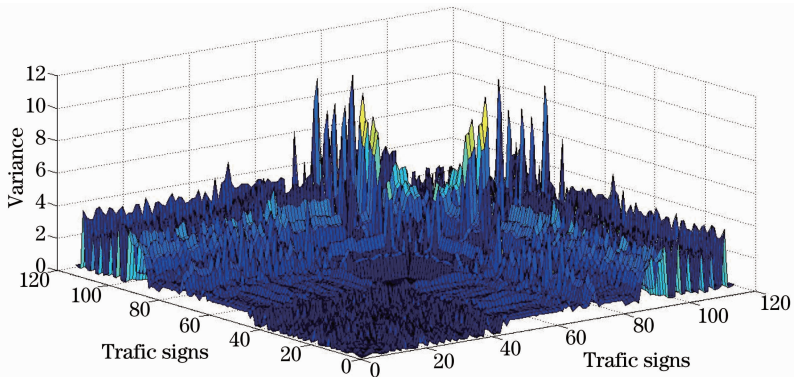


图 14  $S$  通道熵序列类间方差值

Fig. 14 Inter-classes variance of entropy sequence in  $S$  color space

图 15 为三大类 114 个交通标志的熵序列在 V 通道下的分类结果。从图中可以看出,利用标志对

应熵序列差异并无规律,也不适用于标志大类区分。

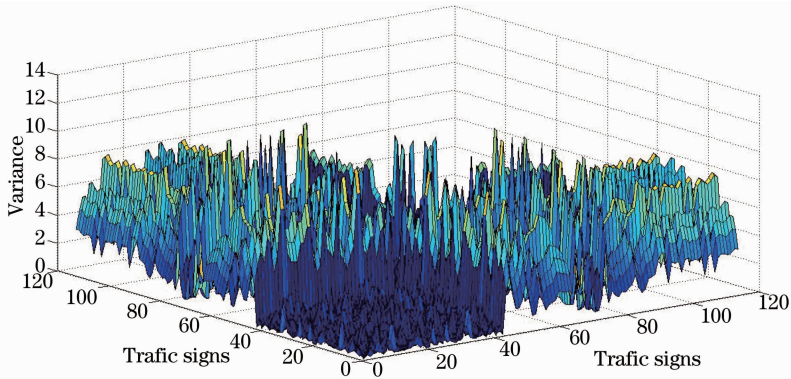


图 15 V 通道熵序列类间方差值

Fig. 15 Inter-classes variances of entropy sequence in V color space

图 16 列出了将彩色图像转换成灰度图像后提取熵序列进行大类分类处理方法的实验结果,从图中可以看出,从灰度度图像中提取的熵序列作为特

征向量时,标志对应熵序列之间的方差值杂乱,无规律可以遵循,无法应用于标志大类区分。

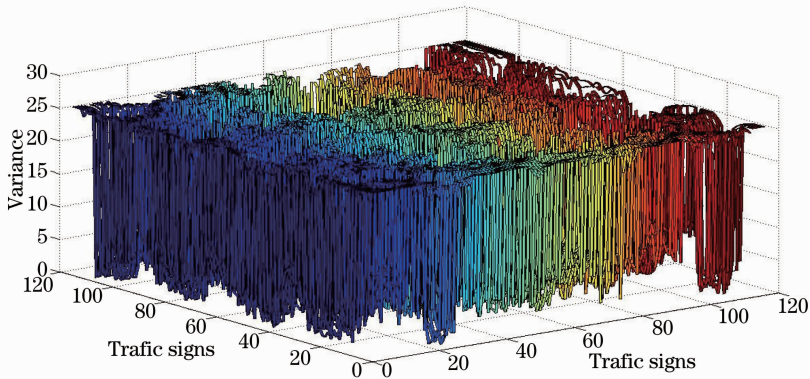


图 16 灰度图像类间熵序列方差值

Fig. 16 Inter-classes variances of entropy sequence in gray space

## 5 结 论

道路交通标志的设计过程中选取了特殊的颜色特征来提示行车交通规则,传统视觉感知理论下交通标志分类特征提取通常是将彩色图像转化为灰度图像进行,没有充分利用色彩信息。为了找到最佳分类特征,在交通标志特征提取过程中应充分考虑色彩信息,利用 PCNN 分别在 RGB 模型和 HSV 模型的颜色空间中求取熵序列作为分类特征,针对国家标准 GB5768-1999 中 114 个标准交通标志图像通过实验选取最佳 PCNN 参数,根据收敛程度选择 PCNN 参数为  $\alpha_L = 1, \alpha_F = 0.1, \alpha_E = 1, V_L = 0.2, V_F = 0.5, V_E = 27, \beta = 0.1$ , 选取  $N = 50$ 。不同彩色空间下各个交通标志图像熵序列的方差差异程度表明,在 B 色彩空间中计算所得的熵序列能够反映出警告标志、指示标志、禁令标志三大类的类间特征,

能够有效地进行大类分类,而其他彩色分量中,类间差距很小,不能作为分类识别的依据,在不增加计算量的同时,克服了传统将彩色图像转换成灰度图像的处理方法中彩色信息丢失的不足,提高了大类分类的效果。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Cheng, Gu Xiaodong. Combining PCNN with color distribution entropy and vector gradient in feature extraction[C]. Chongqing: Natural Computation 2012 Eighth International Conference on China, 2012. 207-211.
- 2 Wu Jiang, Rule H, Xu Ziyue, et al.. Forest fire smog feature extraction based on Pulse-Coupled neural network [C]. Chongqing: International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC) 2011 6th IEEE Joint International, 2011, (1): 186-189.
- 3 Andery V, Jo K H. Automatic detection and recognition of traffic signs using geometric structure analysis [C]. Busan: SICE-ICASE, 2006 International Joint Conference, 2006. 1451-1456.



- 4 Rughooputh H C S, Buootun H, Rughooputh S D D V. Pulse coded neural network for sign recognition for navigation [C]. Maribor: Industrial Technology 2003 IEEE International Conference on Maribor, 2003, (1): 89—94.
- 5 Shen Huan, Li Shunming, Bo Fangchao, *et al.*. On road vehicles real-time detection and tracking using vision based approach [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1076—1083.  
沈 岷, 李舜韶, 柏方超, 等. 路面车辆实时检测与跟踪的视觉方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1076—1083.
- 6 Zhao Haixin, Dai Yun, Zhou Yifei, *et al.*. Human eye neural contrast sensitivity function measurement with wave-front technology [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0433001.  
赵豪欣, 戴 云, 周逸峰, 等. 基于波前技术的人眼神经对比敏感度测量 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0433001.
- 7 GB5768-1999 National Standard of “Road Traffic Signs and Markings” [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.  
GB5768-1999《道路交通标志和标线》国家标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- 8 Xu Qingsong, Su Juan, Liu Tiantian. A detection and recognition method for prohibition traffic signs [C]. Xiamen: Image Analysis and Signal Processing (JASP), 2010 International Conference, 2010. 583—586.
- 9 Wang Yongping, Shi Meiping, Wu Tao. A method of fast and robust for traffic sign recognition [C]. Xi’an: Image and Graphics, 2009. ICIG’09. Fifth International Conference, 2009. 891—895.
- 10 Joshi M, Singh M J, Dalela S. Automatic colored traffic sign detection using optoelectronic correlation architectures [C]. Columbus: Vehicular Electronics and Safety 2008. JCVES 2008. IEEE International Conference, 2008. 75—78.
- 11 Chen Hongbo, Wang Qiang, Xu Xiaorong, *et al.*. Line detection in traffic sign image based on improved Hough transforms [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1111—1118.  
陈洪波, 王 强, 徐晓蓉, 等. 用改进的 Hough 变换检测交通标志图像的直线特征 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5): 1111—1118.
- 12 Tang Jin, Liang Xiong, Xie Bin, *et al.*. A method for traffic signs detection, tracking and recognition [C]. Chingcha: Computer Science and Education (ICCSE), 2010 5th International Conference, 2010. 189—194.
- 13 Lou Yuli, Li Junchang, Gui Jinbin, *et al.*. Research of color digital holography in image space [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0409001.  
楼宇丽, 李俊昌, 桂进斌, 等. 像空间彩色数字全息研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0409001.
- 14 Wu Zhiguo, Wang Yanjie, Li Guiju. Application of adaptive PCNN based on wavelet transform to image fusion [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 708—715.  
武治国, 王延杰, 李桂菊. 应用小波变换的自适应脉冲耦合神经网络在图像融合中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 708—715.
- 15 Wang Zhaobin, Ma Yide, Cheng Feiyan, *et al.*. Review of pulse-coupled neural networks [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(10): 5—13.
- 16 Shao Xiaoguang, Gao Kun, Lv Lili, *et al.*. Unsupervised regions of interest extraction for color image compression [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(1): 011001.
- 17 Liu Haoxue, Huang Min, Wu Bing, *et al.*. Study of color difference evaluation in color digital images [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0933001.  
刘浩学, 黄 敏, 武 兵, 等. 彩色数字图像色差计算方法的研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0933001.

栏目编辑: 李志兰