文章编号:1007-2780(2014)05-0768-09

基于人类视觉的快速自动调焦法

黄德天[1*],刘雪超[2,3],张红胜[2],赵晶丽[2,4]
(1.华侨大学 工学院,福建 泉州 362021;
2.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
3.中国科学院 研究生院,北京 100049;
4.中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:为了提高自动调焦算法的性能,对调焦评价函数和调焦搜索算法进行了研究。在分析人类视觉系统(HVS)特性研究成果的基础上,提出了一种基于 HVS 加权的小波调焦评价函数。根据视觉多通道特性和视觉敏感度带通特性,对不同方向、不同空间频带的小波高频系数分别赋予不同的权值。为了克服爬山法搜索速度慢的缺点,提出了一种基于 SOM 神经网络的搜索算法,采用训练完成的 SOM 神经网络预测镜头的最佳聚焦位置。实验结果表明,提出的小波调焦评价函数得到了比传统小波调焦评价函数更优的调焦特性曲线;采用本文的搜索算法平均仅需要采集处理 7.3 幅图像就能找到最佳聚焦位置,与基于全搜索的爬山法相比,节省了大量的搜索时间。说明提出的调焦方法不但可以得到符合人眼视觉的调焦效果,还可以实现快速自动调焦。

关 键 词:自动调焦;调焦评价函数;调焦搜索算法;人类视觉系统;小波变换;SOM 神经网络
中图分类号:TP391 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20142905.0768

Fast auto-focusing method based on human visual system

HUANG De-tian[1*], LIU Xue-chao[2,3], ZHANG Hong-sheng[2], ZHAO Jing-li[2,4]

(1. *College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou* 362021, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
4. *Key Laboratory of Optics System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: In order to improve the performance of the auto-focusing algorithm, focus measure function and focus search algorithm are studied. On the basis of analyzing the research results of the characteristics of the human visual system (HVS), a weighted wavelet focus measure function is proposed based on HVS. According to the visual multi-channel characteristics and the visual sensitivity band-pass characteristics, the different weights of the high frequency coefficients are set in different

收稿日期:2014-01-02;**修订日期**:2014-02-23.
基金项目:华侨大学科研基金(No. 13BS416);国家 863 高技术研究发展计划(No. 2008AA7034320B);国家自然科学基金(No. 61203242);物联网云计算平台建设(2013H2002)
*通信联系人,E-mail:huangdetian@sina.com

orientations and different spatial frequencies. To overcome the disadvantage of slow search speed of the mountain climbing searching algorithm, an improved searching algorithm is presented based on self-organizing map (SOM) neutral network. The well-trained SOM neutral network is applied to predicting the best focused lens position. The experimental results demonstrate that the characteristic of the proposed wavelet focus measure curve is better than that of traditional wavelet focus measure curve. Only 7.3 images need to be collected and processed averagely in the process of finding the best focused lens position by improved searching algorithm. Compared with the full search method, the proposed approach can reduce the search time greatly. It is concluded that this auto-focusing method can not only obtain the focusing effects in accordance with the human visual system, but also achieve auto-focusing rapidly.

Key words: auto-focusing; focus measure function; focus search algorithm; human visual system; wavelet transform; SOM neural network

1　引　　言

自动调焦是光电成像系统获取清晰图像的关键过程，已成功应用于空间遥感系统、自动监控系统、显微分析系统以及各种数码摄像系统等[1-6]。与基于测距法、像检测法等传统的自动调焦法相比，基于图像处理的自动调焦法具有智能化、高度集成化、低功耗、占用体积小和低成本等优点，随着数字图像处理技术和超大规模集成电路的飞速发展，基于图像处理的自动调焦法成为了调焦技术发展的主流。目前，基于图像处理的自动调焦法的关键在于解决调焦评价函数和调焦搜索算法 2 个问题。调焦评价函数的主要作用是代替人眼对一幅图像是否正确聚焦进行判断；而调焦搜索算法是运用调焦评价函数判断当前的调焦状态，从而实现对调焦机构的控制。

小波变换在时间域和频率域同时具有良好的局部特性，通过多分辨率分析，小波变换可以捕捉到调焦过程中图像的任意细节，因而，基于小波的调焦评价函数能够很好地分辨出图像聚焦和轻微离焦的情况。但由于该类调焦评价函数需要对图像进行小波分解，计算量较大，以前由于嵌入式处理器速度的限制，在快速自动调焦系统中应用较少。而现在一些 DSP 芯片拥有超高性能的计算能力，例如 TI 公司的 C667x 系列多核 DSP，仅单核的处理速度就能达到 10 000 MIPS(每秒百万条指令)，因此，在现有的硬件平台上采用基于小波的调焦评价函数是完全可行的。此外，研究表明基于小波的调焦评价函数不但满足实时性的要求，而且具有较强的抗干扰能力和较高的灵敏度[7-10]。

图像经若干层小波分解后得到一系列的高频系数，包括水平、垂直和对角方向的细节系数。传统的方法是以各层高频系数的平方和作为调焦评价函数，但根据人类视觉系统(HVS)特性的研究成果[11]，人眼对不同方向、不同空间频率的刺激有着不同的敏感度，因此，不同层的高频系数对视觉效果的贡献并不相同，即使同一层不同方向的高频系数对视觉效果的贡献也有差异。为了使调焦评价函数既客观准确，又符合人眼的视觉感知特性，本文根据小波变换与 HVS 多通道特性相匹配的特点，提出了一种基于 HVS 加权的小波调焦评价函数。

在调焦搜索算法中，最常用的是爬山法，以及研究人员改进的一些爬山法[12-14]，但仍然需要较长的搜索时间，调焦速度往往不能满足需求。为了提高搜索效率，将 SOM(Self-organizing Map)神经网络[15-17]的自动聚类功能应用到爬山法中，提出了一种带有预测最佳聚焦位置功能的改进爬山搜索法。

2　基于人类视觉系统的调焦评价函数

2.1　人类视觉系统特性

人类视觉系统(human visual system, HVS)是由大量功能形态各异的神经细胞通过一定的方式连接组成的信息处理系统，是现有的最复杂的图像处理系统。目前，许多实验已经发现了 HVS

的一系列特性[11]，如视觉多通道特性、视觉非线性特性、视觉敏感度带通特性和掩盖效应等。其中，视觉多通道特性是指人类视觉系统类似于一组有方向的带通滤波器，对不同颜色，不同方向，不同空间频率的刺激有着不同的敏感度。视觉敏感度带通特性是指人眼分辨亮度差异的能力，受到很多条件的影响，空间频率不同时，对比度敏感的响应也不同。视觉敏感度带通特性可以采用对比敏感度函数（Contrast Sensitivity Function，CSF）来表征，虽然不同实验得出的 CSF 函数形式各异，但基本都认为 HVS 的对比度敏感是空间频率 f 的函数，且具有带通滤波器的性质，为各向异性。目前在图像处理中常用的 CSF 函数表达式为[18]：

$$A(f)=2.6\times(0.019\,2+0.114f)\times\exp[-(0.114f)^{1.1}], \tag{1}$$

其中：f 表示图像的空间频率，$A(f)$ 表示人类视觉的带通特性。

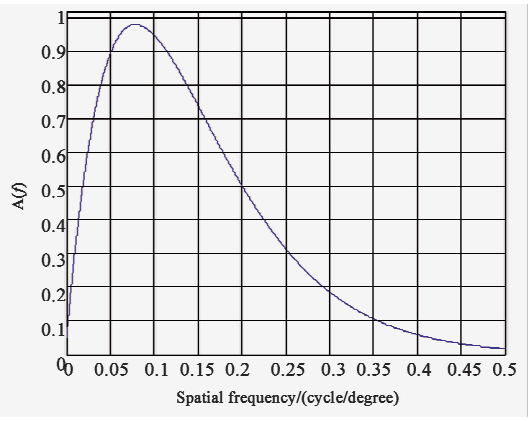


图 1 CSF 特性曲线

Fig. 1 CSF property curve

CSF 函数的频率响应曲线如图 1 所示，横轴为图像的空间频率，单位为周/度（cycle/degree）；纵轴为 CSF 的幅值。从图 1 可以看出人眼视觉对某一区间内的空间频率对比度变化最为敏感，而在频率较低或较高处敏感度降低。

2.2 基于 HVS 加权的调焦评价函数

小波变换是一种时频分析方法，具有很好的局部时频特性，能有效地提取信号的局部信息，享有“数字显微镜”的美称。图像经 n 层小波分解后，可得到一系列不同频率不同方向的子带：低频子带 LL_n 反映了图像的大体结构，而高频子带 HL_i、LH_i 和 HH_i（$i\in1,2,\cdots,n$）反映了图像的边缘、区域轮廓等细节信息。其中，HL_i 子带包含了水平方向的高频信息，LH_i 子带包含了垂直方向的高频信息，HH_i 包含了对角线方向的高频信息。

图像聚焦时，小波分解得到的高频系数能量最大，随着图像离焦程度的加剧，小波分解后的高频系数能量随之变小。传统的小波变换评价函数是将各层小波高频系数的平方和作为调焦评价函数[19-20]，其表达式如下：

$$M_{\mathrm{WT}}=\sum_{i=0}^{n}\Big[\sum_{(x,y)\in S_{\mathrm{HL}_i}}W_{HL_i}^2(x,y)+\sum_{(x,y)\in S_{LH_i}}W_{LH_i}^2(x,y)+\sum_{(x,y)\in S_{HH_i}}W_{HH_i}^2(x,y)\Big], \tag{2}$$

式中：n 为小波分解的层数，W_{HL_i}、W_{LH_i}、W_{HH_i} 分别为第 i 层分解所对应的水平、垂直、对角方向的高频系数；S_{HL_i}、S_{LH_i}、S_{HH_i} 分别为第 i 层分解所对应的水平、垂直、对角方向的高频窗口。但根据人类视觉系统的特性，不同层的高频系数对视觉效果的贡献并不相同，同一层不同方向的高频系数对视觉效果的影响也并有差异。为了使调焦评价函数既满足客观准确的要求，又符合人眼的视觉效果，提出了一种基于 HVS 加权的小波调焦评价函数：

$$M'_{\mathrm{WT}}=\sum_{i=0}^{n}\lambda_i\cdot\Big[\alpha\cdot\sum_{(x,y)\in S_{HL_i}}W_{HL_i}^2(x,y)+\beta\cdot\sum_{(x,y)\in S_{LH_i}}W_{LH_i}^2(x,y)+\gamma\cdot\sum_{(x,y)\in S_{HH_i}}W_{HH_i}^2(x,y)\Big], \tag{3}$$

其中：λ_i 为第 i 层高频系数对应的权值（简称：空间频率权值）；α、β、γ 分别为水平、垂直、对角方向高频系数对应的权值（简称：空间方向权值）。

2.2.1 小波基的选择

选择不同的小波基对同一图像进行分解，得到的分析效果往往差异很大，因此首先应该选择合适的小波基。由于提出的调焦评价函数是基于小波变换和 HVS 视觉多通道特性的相似性，所以选用的小波基不仅需要具有紧支集小和消失矩高的特性，同时，还需要具有很好的能量集中特性和精确重构特性。具体的小波基选取标准可以参考文献[21]，本文选用该文献中的 sym8 作为小波基。

2.2.2　分解层数的确定

对图像进行小波分解时，即使在同一小波基下也会因分解层数不同而得到不同的效果，因此还需要确定合适的小波分解层数。采用 sym8 小波基，对从离焦到正焦再到离焦的图像序列分别进行 1、2、3、4、5 层小波分解，对高频系数能量的统计结果如图 2 所示。当进行 5 层小波分解时，清晰度评价函数出现了拐点，由此可知，对图像进行 5 层小波分解时，出现了伪高频成分，即第 5 层的高频成分受到了低频成分的影响。而只进行 1 层、2 层或 3 层分解时，评价函数在聚焦图像两侧出现了较大的饱和区，不利于搜索镜头的聚焦位置，因此选择分解层数 $n=4$ 比较合适。

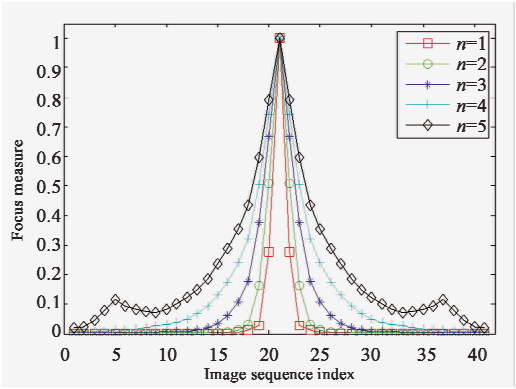


图 2　不同分解层分析的性能比较

Fig. 2　Comparison of performance at different depths

2.2.3　调焦评价函数的权值选取

(1)空间频率权值

利用 CSF 的非线性带通特性，取相应频带内 CSF 幅值的平均值作为不同频带的高频系数的空间频率权值。对于 4 级小波分解，整个频带按频率划分成 5 部分，带有权值的 CSF 特性曲线如图 3 所示，各个频带$[LH_1, HL_1, HH_1]$，$[LH_2, HL_2, HH_2]$，$[LH_3, HL_3, HH_3]$，$[LH_4, HL_4, HH_4]$，LL_4 在其对应频段上的权值分别为 0.087 2，0.568 8，0.945 5，0.858 3，0.42，对其中的高频子带的权值进行归一化，得到与第 i 层高频系数对应的空间频率权值分别为：$\lambda_1=0.035\ 5$、$\lambda_2=0.231\ 2$、$\lambda_3=0.384\ 4$、$\lambda_4=0.348\ 9$。

(2)空间方向权值

空间方向权值的确定比较简单，根据 HVS 的视觉多通道特性，视觉系统对水平方向(0°)和垂直方向(90°)的刺激最敏感，而往对角方向的敏感性逐渐减弱，对于对角线方向(45°或 135°)的刺激最不敏感。因此，在同一层小波分解后的高频系数中，对表示水平方向和垂直方向的高频系数赋予较大的权值，对表示对角方向的高频系数赋予较小的权值，得到各层 HL、LH、HH 对应的空间方向权值分别为 $\alpha=0.4$、$\beta=0.4$、$\gamma=0.2$。

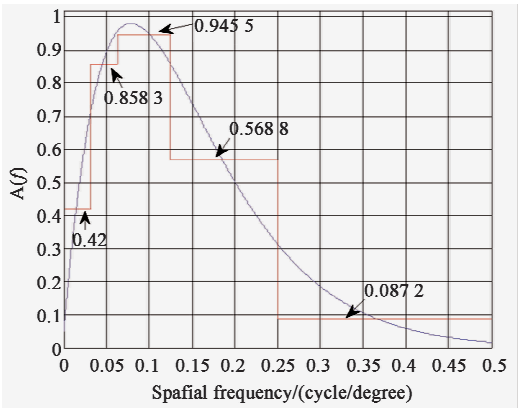


图 3　带有加权值的 CSF 特性曲线

Fig. 3　Weighted CSF property curve

3　基于 SOM 神经网络的搜索算法

在自动调焦的搜索算法中，最常用的是爬山法及一些改进的爬山法。爬山法在搜索过程中，电机每前进一个步长就需要停下来计算该位置对应图像的调焦评价值，然后根据评价值的变化情况来确定电机下一步的前进方向，且需要对整个调焦区域进行全局判断搜索，这样大大增加了搜索时间。此外，爬山法容易受到评价函数局部峰值的干扰而不能准确聚焦。为了克服爬山法的上述缺点，提出了一种基于 SOM 神经网络的搜索算法。

自组织映射(Self-organizing Map，SOM)神经网络[15-17]是一种良好的无导师学习聚类网络，能够自动寻找样本中的内在规律和本质属性，自组织、自适应地改变网络权值和结构。SOM 神经网络的训练过程是基于竞争学习算法实现的。图 4 为二维形式的 SOM 神经网络结构图。

将 SOM 神经网络的输入层和竞争层分别定义如下：

$$\boldsymbol{s}=[s_1, s_2, \cdots, s_n]^{\mathrm{T}}, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{k}=\begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{a1} & \cdots & k_{ab} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

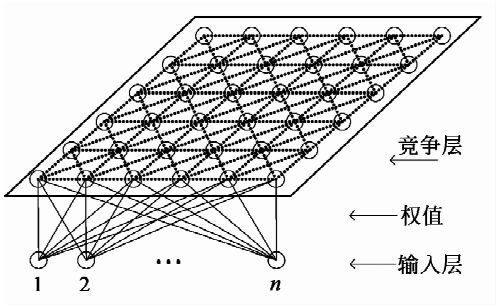


图 4 二维 SOM 神经网络结构

Fig. 4 Two-dimensional SOM neural network structure

其中：n 是输入层神经元的个数；a 和 b 分别是竞争层神经元的行数和列数。

竞争层 $\boldsymbol{k}$ 的每个神经元 $\boldsymbol{k}$ 的维数都与输入层 $\boldsymbol{s}$ 的维数相同，因此，权向量 $\boldsymbol{w}_i$ 可以表示为：

$$\boldsymbol{w}_i = [w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in}]^{\mathrm{T}}. \tag{6}$$

输入层各神经元通过权向量 $\boldsymbol{w}_i$ 将外界信息汇集到竞争层的各神经元。本文中，输入层的训练样本为镜头在不同位置处对不同距离的景物所采集图像的调焦评价值。根据自动调焦的原理，聚焦的图像对应较高的调焦评价值，而离焦的图像对应较低的调焦评价值。为了便于说明，仅讨论 3 个目标物体 O_1、O_2、O_3 在 3 种不同物距 L_1、L_2、L_3 下的调焦情况，根据提出的小波调焦评价函数计算出在不同镜头位置处采集的图像对应的调焦评价值，如图 5 所示，并将这一系列评价值作为 SOM 神经网络的输入样本，SOM 网络根据输入样本的数值自动调节其网络权值 $\boldsymbol{w}_i$，在这种情况下，训练之后的 SOM 网络的输出层自动分成了 9 类：第 1 类对应 O_1 和 L_1，第 2 类对应 O_1 和 L_2，…，第 9 类对应 O_3 和 L_3。需要说明的是，权向量 $\boldsymbol{w}_i$ 的初始值可以定义为任意的随机数。

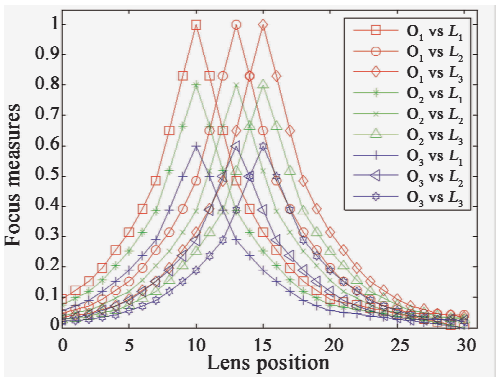


图 5 不同景物在不同镜头位置所对应的调焦评价值

Fig. 5 Focus measures of different objects with different lens positions

通过计算 $\boldsymbol{s}$ 与 $\boldsymbol{w}_i$ 的欧氏距离，从中选出距离最小的神经元作为获胜神经元 $b(s)$，其表达式如下：

$$b(s) = \arg\min_i \| \boldsymbol{s} - \boldsymbol{w}_i \|. \tag{7}$$

一旦找到获胜神经元，权向量 $\boldsymbol{w}_i$ 就可以更新了，与获胜神经元邻近的所有神经元的向量权值按照式(8)进行调整：

$$\boldsymbol{w}_i(t+1) = \boldsymbol{w}_i(t) + \eta(t) N_{i,b(s)}(t)(\boldsymbol{s} - \boldsymbol{w}_i(t)), \tag{8}$$

其中：t 为时间参数；$\eta(t)$ 是学习率，为随时间衰减的函数；$N_{i,b(s)}(t)$ 为以获胜神经元 $b(s)$ 为中心的邻域函数，本文采用高斯邻域函数，其表达式如下：

$$N_{i,b(s)}(t) = \exp\left\{-\frac{d_{i,b(s)}^2}{2\sigma^2(t)}\right\}, \tag{9}$$

其中：$d_{i,b(s)}$ 表示获胜神经元 $b(s)$ 和其邻近神经元 i 的距离；$\sigma(t)$ 为随时间呈指数衰减的函数。

SOM 神经网络首先需要通过输入样本完成训练，训练完成的 SOM 就可以根据输入样本的数据确定其对应的输出类别，电机就根据定义好的输出类别将镜头移到预先定义的最佳聚焦位置。用矩阵 $\boldsymbol{z}$ 来表示预先定义的最佳聚焦位置，其对应的表达式如式(10)：

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{a1} & \cdots & z_{ab} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

其中：$\boldsymbol{z}$ 的维数与竞争层 $\boldsymbol{k}$ 的维数相同。

基于 SOM 神经网络的搜索算法的工作流程如图 6 所示，在 SOM 神经网络完成训练的前提下，首先将镜头移回起始位置，接着通过 3 个镜头位置 s_0、s_1 和 s_2 的调焦评价值作为 SOM 神经网络的输入，经过训练完成的 SOM 神经网络预测得到最

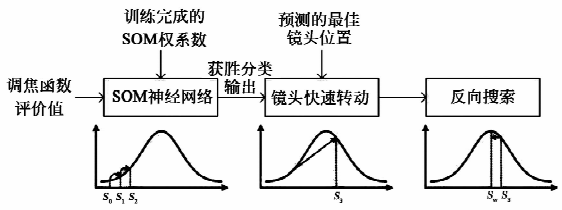


图 6 基于 SOM 神经网络的搜索算法

Fig. 6 Searching algorithm based on SOM neural network

佳聚焦位置 s_3，然后将镜头快速移动到位置 s_3，再通过 SOM 网络预测得到一个更加精确的最佳聚焦位置，然后由电机带动镜头继续搜索；如此反复几次，镜头的最佳聚焦位置 s_w 可以轻易找到。

4　实验结果

为了验证提出的调焦方法，设计了基于 PC 机的自动调焦系统实验平台，其流程如图 7 所示。系统采用 XC-EI30CE CCD 摄像机和焦距为 10～330 mm 的 Raymax 镜头，在 PC 机端使用图像采集卡天敏 SDK2000 完成对 CCD 摄像机输出图像的采集，然后在 VC＋＋中根据提出的调焦算法完成调焦评价值的计算和调焦搜索算法对镜头的控制，最后通过 RS-232 接口发送控制命令到调焦电机控制板，由其控制电机带动镜头以实现自动调焦。

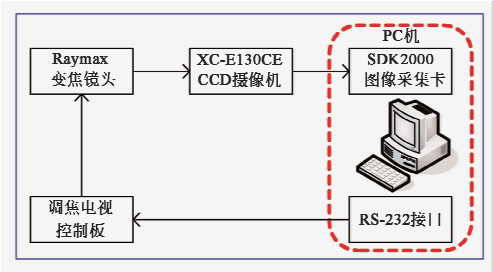


图 7　自动调焦系统流程图

Fig. 7　Chart of the auto-focusing system

4.1　调焦评价函数的性能测试

通过连续改变镜头的位置采集一系列从离焦到聚焦再到离焦的图像，一共 41 幅，其中第 21 幅为聚焦图像。分别采用文献[20]提出的基于各层高频系数平方和的小波评价函数、文献[22]提出的小波评价函数、以及本文提出的基于 HVS 加权的小波评价函数对采集到的图像进行分析，得到的调焦评价曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出，提出的基于 HVS 加权的小波评价函数比文献[20]提出的小波评价函数有更高的灵敏度；而与文献[22]提出的小波评价函数曲线相比，虽然文献[22]提出的小波评价函数曲线在聚焦位置附近具有较高的灵敏度，但是该曲线的有效调焦区域过小，过大的调焦饱和区不利于调焦搜索算法寻找最佳聚焦位置；综上所述，本文提出的小波评价函数的调焦曲线特性优于文献[20]和文献[22]

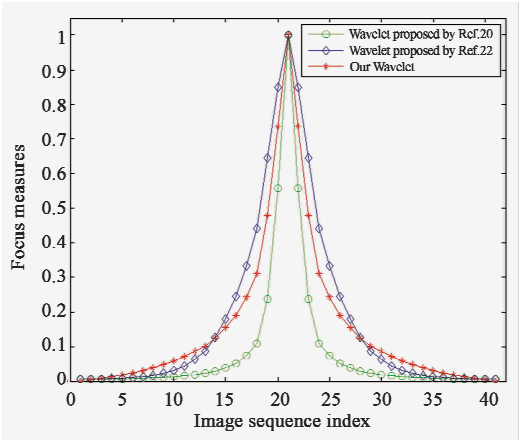


图 8　三种小波调焦评价函数的曲线

Fig. 8　Curves of 3 kinds of measure function based on wavelet

提出的小波评价函数。

4.2　调焦搜索算法的性能测试

先通过改变镜头位置对不同物距的景物采集一系列图像，并将这一系列图像的调焦评价值作为训练样本，用以完成 SOM 神经网络的训练。训练完成的 SOM 神经网络就可以用来预测镜头的最佳聚焦位置了，实验中，将 SOM 网络的输出层分成 49 种类别。

选取不同的场景进行了 100 次调焦实验，限于篇幅，仅给出最具代表性的两组实验进行分析比较。第 1 组实验使用的场景是实验室对面的大烟囱，如图 9 所示，其图像序列描述了从离焦到聚焦的整个过程，图像在第 6 帧时已经聚焦。第 2 组实验使用的场景是外场的建筑，如图 10 所示，其图像序列描述了从离焦到聚焦的整个过程，图像在第 8 帧时已经聚焦。

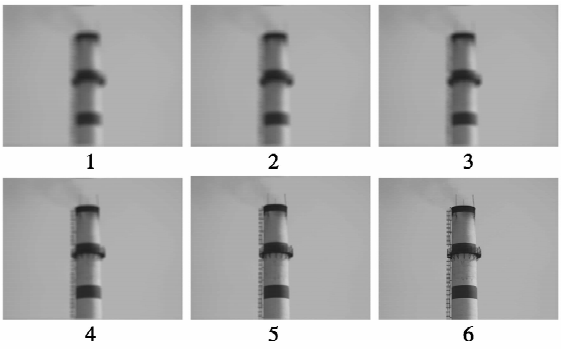


图 9　第 1 组调焦实验的图像序列

Fig. 9　Experiment I: Image sequence in auto-focusing process

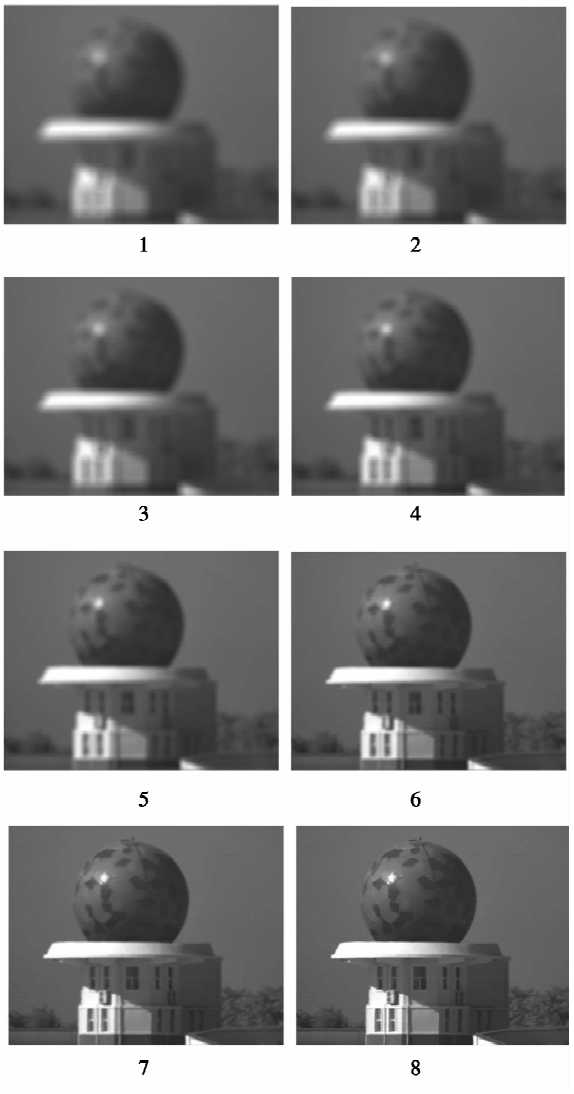


图 10 第 2 组调焦实验的图像序列

Fig. 10 Experiment II: Image sequence in auto-focusing process

自动调焦的时间主要包括采集图像、评价图像和电机驱动镜头的时间。为了将提出的搜索算法与基于全局搜索的爬山法对比,进行了相应的比较实验,记录了 100 次调焦实验中需要采集和评价的图像数目,并做了统计,统计结果如表 1 所示。由表 1 可知,采用提出的改进爬山法在搜索最佳聚焦位置的过程中,平均仅需要采集和评价 7.3 幅图像,与基于全局搜索的爬山法相比,减少了电机驱动镜头的次数,节省了大量时间,提高了自动调焦的速度。

表 1 采集和评价图像的数目统计

Tab. 1 Statistics of the number of images collected and measured

	图像的数目/幅		
	平均	最多	最少
本文的搜索算法	7.3	13	5
全搜索爬山算法	19.2	24	16

5 结 论

分析了人类视觉系统特性的研究成果,针对 HVS 多通道特性和小波变换相匹配的特点,提出了一种基于 HVS 加权的小波调焦评价函数。根据视觉多通道特性和视觉敏感度带通特性,分别对不同方向、不同空间频率的小波高频系数进行加权运算。由于提出的调焦评价函数模拟了人类视觉系统的特性,获得的聚焦图像更接近于人的主观评价。为了提高自动调焦的搜索速度,利用 SOM 神经网络的自动聚类功能,提出了一种带有预测功能的搜索算法。与基于全局搜索的爬山法相比,提出的搜索算法仅需要采集处理 7.3 幅图像就能找到镜头的最佳聚焦位置,减少了电机驱动镜头的次数,节省了大量的搜索时间。实验结果表明,本文提出的调焦方法可以得到符合人眼视觉的调焦效果,同时调焦速度也有了较大的提高。

参 考 文 献:

[1] Wang D J, Ding W, Zhang T, *et al*. A fast auto-focusing technique for the long focal lens TDI CCD camera in remote sensing applications [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 7(5): 1-8.

[2] 卢振华,郭永飞, 李云飞,等. 利用 CCD 拼接实现推扫式遥感相机的自动调焦[J]. 光学 精密工程,2012,20(7): 1559-1565.

Lu Z H, Guo Y F, Li Y F, *et al*. Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1559-1565. (in Chinese)

[3] 刘炳强，张帆，李景林，等. 空间相机调焦机构运动同步性误差分析[J]. 中国光学，2013，6(6)：946-951.
Liu B Q，Zhang F，Li J L，*et al*. Analysis of synchronous motion error for focusing mechanism of space camera [J]. *Chinese Optics*，2013，6(6)：946-951. (in Chinese)

[4] 许志涛，龙科慧，刘金国，等. 空间相机调焦机构精度检测系统设计[J]. 液晶与显示，2013，28(6)：943-947.
Xu Z T，Long K H，Liu J G，*et al*. Design of focusing mechanism accuracy detection system of space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2013，28(6)：943-947. (in Chinese)

[5] 杨会生，张银鹤，柴方茂，等. 离轴三反空间相机调焦机构设计[J]. 光学 精密工程，2013，21(4)：948-954.
Yang H S，Zhang Y H，Chai F M，*et al*. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*，2013，21(4)：948-954. (in Chinese)

[6] 陈伟，丁亚林，惠守文，等. 推扫式航空遥感器像面调焦机构设计[J]. 中国光学，2012，5(1)：30-34.
Chen W，Ding Y L，Hui S W，*et al*. Design of image plane focusing structure for push-scan aerial remote sensing instrument [J]. *Chinese Optics*，2012，5(1)：30-34. (in Chinese)

[7] Yin A J，Chen B Q，Zhang Y. Focusing evaluation method based on wavelet transform and adaptive genetic algorithm [J]. *Optical Engineering*，2012，51(2)：023201.

[8] 王德江，李文明，许永森，等. TDI-CCD 全景航空相机快速自动检调焦方法[J]. 光电子·激光，2012，23(8)：1452-1457.
Wang D J，Li W M，Xu Y S，*et al*. A fast auto-focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*，2012，23(8)：1452-1457. (in Chinese)

[9] Pertuz S，Puig D，Garcia M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus [J]. *Pattern Recognition*，2012：1-18.

[10] 陈晓彬. 基于小波的自动对焦算法研究[J]. 通信技术，2010，43(6)：210-212.
Chen X B. Study on auto-focus algorithm based on wavelet transform [J]. *Communications Technology*，2010，43(6)：210-212. (in Chinese)

[11] Daubeehies，Swelden W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. *J. Fourier Anal. Appl*，1998，4(3)：245-267.

[12] 黄德天，吴志勇，刘雪超，等. 一种适用于任意目标的离焦深度快速自动聚焦技术[J]. 光电子·激光，2013，24(4)：799-804.
Huang D T，Wu Z Y，Liu X C，*et al*. A depth from defocus fast auto-focusing technology for any target [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*，2013，24(4)：799-804. (in Chinese)

[13] 王代华，周锋，吴朝明. 基于阈值的调焦方向判断方法[J]. 仪器仪表学报，2010，31(8)：1813-1818.
Wang D H，Zhou F，Wu Z M. Direction judgment method for autofocus based on threshold [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*，2010，31(8)：1813-1818. (in Chinese)

[14] Xu D J. A unified approach to autofocus and alignment for pattern localization using hybrid weighted Hausdorff distance [J]. *Pattern Recognition Letters*，2011(32)：1747-1755.

[15] Kohonen T. The self-organization maps [J]. *Proceedings of the IEEE*，1990，78(9)：1464-1480.

[16] Kohonen T. *Self-Organization and Associative Memory* [M]. 2nd Ed. Berlin：Springer-Verlag，1987.

[17] Kohonen T. Essentials of the self-organizing map [J]. *Neural Networks*，2013(37)：52-65.

[18] Mannos J L，Sakrison D J. The effect of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. *IEEE Transactions on Inform. Theory*，1974，20(2)：525-536.

[19] 张乐，姜威. 多分辨力分析在自动聚焦算法抗噪声性能中的应用[J]. 光学学报，2007，27(12)：2150-2154.
Zhang L，Jiang W. Application of multi-resolution analysis in anti-noise capability of auto-focusing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*，2007，27(12)：2150-2154. (in Chinese)

[20] 管维乐，姜威，周贤. 一种基于小波变换的数字图像自动聚焦算法[J]. 山东大学学报：工学版，2004，34(6)：38-40，59.
Jian W L，Jiang W，Zhou X. Auto-focusing algorithm of digital image based on wavelet transform [J]. *Journal of Shandong University：Engineering Science*，2004，34(6)：38-40，59. (in Chinese)

[21] 丁艺芳. 基于小波变换和视觉系统的图像质量综合评价新算法[D]. 上海：上海大学，2001.

Ding Y F. A new algorithm for integrated image quality measurement base on wavelet transform and human visual system [D]. Shanghai: Shanghai University, 2001. (in Chinese)

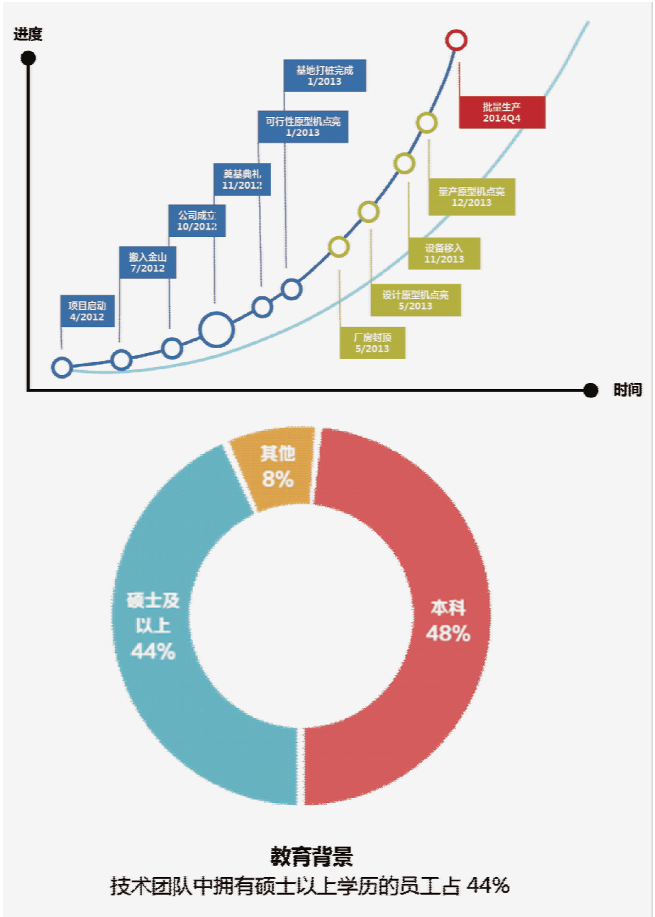
[22] 王义文,刘献礼,谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3-D 自动调焦技术[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1063-1069.

Wang Y W, Liu X L, Xie H. A wavelet-based focus measure and 3-D autofocusing for microscope images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 1063-1069. (in Chinese)

作者简介:黄德天(1985—),男,福建龙岩人,博士,讲师,主要从事视频调焦算法、图像复原、嵌入式系统等方面的研究。E-mail:huangdetian@sina.com

上海和辉光电有限公司

和辉光电成立于 2012 年 10 月,是由上海市政府和金山区政府共同投资的上海市战略性新兴产业重点项目。公司专注于中小尺寸 AMOLED 显示屏量产和下一代显示技术的研发。一期投资总额 60 亿人民币,前期项目于 2012 年 11 月破土动工,预计 2014 年第四季度开始批量生产,建成后将成为国内第一条、设备最完善、技术最先进的第 4.5 代低温多晶硅(LTPS)AMOLED 量产线,率先在 AMOLED 量产工艺领域取得突破。



地址:上海市金山区九工路 1568 号
邮编:201506
电话:138-168-40495(于涛)
邮箱:barry516@163.com