

## 基于仿人眼自适应调节的多光谱视觉图像处理方法

宋言明<sup>1</sup>, 潘志康<sup>2</sup>, 孟晓辰<sup>2</sup>, 娄小平<sup>2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100192;  
2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

**摘要:** 针对传统仿生视觉系统中目标图像获取单一性问题, 提出一种仿人眼自适应调节的多光谱视觉成像技术。首先, 通过改进的自动调焦算法使成像系统同时采集可见光高分辨率图像及近红外低分辨率图像。然后, 对于多光谱成像系统中由于分光棱镜折射率不同导致的在固定焦距下, 可见光和近红外图像清晰度有所不同的问题, 采用改进的二代小波变换进行近红外图像增强, 提高图像对比度, 改善视觉效果。最后, 搭建基于液体变焦透镜的多光谱实验系统验证自动调焦算法及图像增强算法的实际性能。实验结果表明: 系统完成有效自动调焦的平均用时为 756 ms。同时, 近红外图像增强后其灰度方差函数值提高了 79.4%, 解决了对比度低和细节模糊的问题, 最终实现自适应调节。

**关键词:** 仿生视觉; 多光谱; 自动调焦; 图像增强; 液体变焦透镜

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0910001

## Multispectral visual image processing method based on adaptive regulation of humanoid eye

Song Yanming<sup>1</sup>, Pan Zhikang<sup>2</sup>, Meng Xiaochen<sup>2</sup>, Lou Xiaoping<sup>2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center for Optoelectronic Information and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Aiming at the single character of target image acquisition in the traditional bionic vision system, multispectral visual image processing method based on adaptive regulation of humanoid eye was proposed. Firstly, the improved automatic focusing algorithm was used to collect the high resolution image of visible light and the low resolution image of near-infrared light. In the multispectral imaging system, there were different problems of visible and near-infrared image resolution under fixed focal length due to different refractive index of spectral prism. The improved two-generation wavelet transform was adopted to enhance the image contrast and improve the visual effect. Finally, the performance of automatic focus algorithm and image enhancement algorithm was verified by using a multi-spectral experimental device based on liquid zoom lens. The experimental results indicate that the average time of effective auto focusing system is 756 ms, and the gray variance function value increases by 79.4% after near infrared image enhancement, which solves the problem of low contrast and fuzzy details and realizes adaptive regulation.

**Key words:** bionic vision; multispectral; auto focusing; image enhancement; liquid zoom lens

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 教育部“创新团队发展计划”(IRT\_16R07)

作者简介: 宋言明(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事传感器设计与仿生机器人方面的研究。Email: sym0823@163.com

通讯作者: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测及视觉图像处理方面的研究。Email: zhulianqing@sina.com

## 0 引言

仿人眼自适应调节图像处理涉及到自动调焦与图像增强技术,它们是智能机器人仿生物视觉感知进行物体特征识别的关键技术。与基于测距法、像检测法等传统的调焦方法相比,基于图像处理的自动调焦具有智能化、低功耗、高度集成化、体积小及成本低等优点。近年来,以仿人眼为代表的自动调焦技术发展迅速。事实上,现阶段基于图像处理的被动式自动调焦技术已经成为了调焦技术发展的主流。自动调焦就是通过镜头和图像传感器采集到数字图像,按相应调焦准则计算图像中所包含信息来判断系统聚焦是否准确,成像是否清晰,同时给出反馈信号驱使变焦镜头焦距变化,直到采集的图像清晰度符合要求,即完成自动调焦<sup>[1-2]</sup>。而图像增强的主要目的则是抑制图像在获取和传输过程中掺杂进入的无用噪声,突出图像中的有用信息,使图像对比度更高,尽可能的符合人的视觉效果,或使图像转变成有利于计算机识别和分析的形式,提高图像的后续处理能力和应用价值<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内外很多学者针对不同的成像系统对这两部分内容进行了大量的研究,并提出了多种自动调焦及图像增强方法<sup>[5-9]</sup>。但纵观其研究可知,所述方法都是针对单波段成像系统,而且文献中的自动调焦及图像增强算法也只适用于单通道可见光图像。

鉴于目前相关研究的局限性,文中从人类视觉系统能实现全局性观测及细节性观测出发,提出一种新型的仿生型视觉自动调焦及图像增强技术,用多光谱近红外通道模拟人眼全局观测功能,用可见光通道模拟人眼细节观测功能,对目标物体同时输出可见光图像及近红外图像,建立一种新型的仿人眼视觉成像系统。针对多光谱成像系统经自动调焦初步成像后,可见光及近红外图像清晰度有所不同的问题,利用图像增强技术提升近红外图像的对比度,改善其视觉效果。最后搭建基于液体变焦透镜的多光谱成像实验系统,验证文中自动调焦算法实际性能,同时检验近红外图像增强后的实际效果,系统最终实现自适应调节。

## 1 多光谱成像系统

### 1.1 多光谱成像原理

多光谱成像技术,也叫多通道光谱成像技术,它

是利用多种光学元件对目标场景进行多通道成像,根据分光原理不同,多光谱成像技术可以分为色散型、干涉型及滤光片三大类<sup>[10]</sup>。其中,干涉型多光谱成像对平台稳定性要求较高且能量较分散;滤光片多光谱成像需涉及到复杂的光路结构,对精度要求较高且不易实现;相比而言,色散型多光谱成像具备较好的实时性,适用于实时性要求较高的仿人眼视觉成像系统中。

### 1.2 可见光及近红外成像系统

对于色散型多光谱成像光学系统而言,为保证各波段视场一致性,各波段光束由同一光路采集,经分光棱镜分光后入射到各自图像传感器。文中所采用的可见光及近红外两通道成像原理如图 1 所示。

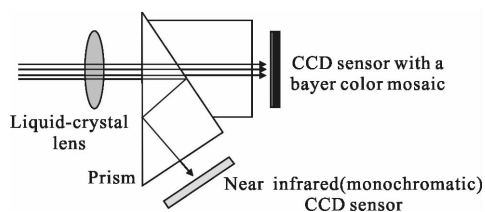


图 1 可见光和近红外成像原理

Fig.1 Visible and near infrared imaging principle

## 2 自动调焦算法

### 2.1 图像清晰度评价函数

在自动调焦过程中,图像清晰度评价函数是判断图像是否聚焦的重要依据。事实上,理想的评价函数应该具有无偏性、单峰性、灵敏性等特性。其中,无偏性和单峰性决定算法能否正确聚焦,而灵敏性则是进行实时检测的基本要求。其中,灰度梯度是一种较常使用的评价函数,但现阶段提出的诸多基于灰度梯度的评价函数在灵敏度及调焦时效性方面并不能满足仿人眼视觉领域的高要求,考虑到实际场景中图像梯度方向的多向性以及人类视觉系统对水平及垂直方向的刺激最敏感,而对斜角方向的敏感性逐渐减弱的特点<sup>[11]</sup>,文中提出一种改进的灰度梯度函数,在计算图像梯度时将像素点邻域不同方向的梯度赋予不同权重,经实验证明可有效提高评价函数灵敏度及调焦时效性,具体理论实现过程为:假设图像某像素点 $(x,y)$ 处的灰度值为 $f(x,y)$ ,则与其周围的八邻域像素的位置关系如下所示:

$$\begin{bmatrix} f(x-1,y+1) & f(x,y+1) & f(x+1,y+1) \\ f(x-1,y) & f(x,y) & f(x+1,y) \\ f(x-1,y-1) & f(x,y-1) & f(x+1,y-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

由图像灰度差分原理可知,像素(x,y)与其邻域的灰度梯度相关度可表示为:

$$\begin{cases} N_1=|f(x,y)-f(x-1,y+1)| \\ N_2=|f(x,y)-f(x,y+1)| \\ N_3=|f(x,y)-f(x+1,y+1)| \\ N_4=|f(x,y)-f(x-1,y)| \\ N_5=|f(x,y)-f(x-1,y-1)| \\ N_6=|f(x,y)-f(x+1,y)| \\ N_7=|f(x,y)-f(x+1,y-1)| \\ N_8=|f(x,y)-f(x,y-1)| \end{cases} \quad (2)$$

则像素(x,y)的梯度可表示为:

$$g(x,y)=m(N_1+N_3+N_5+N_7)+n(N_2+N_4+N_6+N_8) \quad (3)$$

式中:系数 m 和 n 分别为像素的斜对角方向和水平及垂直方向梯度在整个梯度计算中的权重系数,实验中可根据实际场景信息调整系数值。

同时为了减少图像中梯度较平坦区域的像素以及噪声对清晰度评价函数的影响,此处设定梯度阈值,当图像梯度大于它才会被利用。

$$G(x,y)=\begin{cases} g(x,y) & g(x,y) \geq k \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

采用基于 Otsu 准则的迭代搜索方法<sup>[12]</sup>通过实验分析得到最佳阈值。基于此,文中改进的基于人类视觉特性的图像清晰度评价函数表达式为:

$$E_v(x,y)=\frac{1}{T} \sum_{(x,y)} G(x,y) \quad (5)$$

式中:T为调焦区域内总像素点个数,对于清晰度较好的图像而言,以上评价函数应该具有较大值。

## 2.2 自适应变步长搜索策略

与图像清晰度评价函数一样,极值搜索策略也是影响自动调焦算法性能的重要因素。搜索策略要求收敛速度快、准确率高。传统爬山搜索策略的主要缺点是步长确定主观性较强。如步长太小,采集处理图像花费的时间较长,调焦实时性差,且易受外界噪声、环境变化等影响。相反,步长选的过大,虽然速度会有所提升,但调焦精度较低,故文中采用自适应变步长极值搜索策略,并结合液体变焦透镜响应速度快、变焦平滑等特点实现整个搜索过程,其基本流程如图 2 所示。

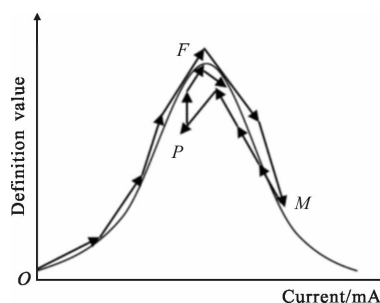


图 2 自适应变步长搜索策略

Fig.2 Adaptive variable step search strategy

Step1: 系统起始位置位于远焦点 O, 清晰度评价函数值为 E, 在液体变焦透镜驱动电流量程内首先往电流增大方向以大步长 S<sub>1</sub> 进行搜索, 并记录相应评价函数值。

Step2: 根据 Step1 进行大步长搜索过程, 如采样点 M 的评价函数值连续出现两次下降, 以大步长输出电流相反方向以中步长 S<sub>2</sub> 进行搜索, 并实时计算相应评价函数值。

Step3: 根据 Step2 进行中步长搜索过程, 如果采样点评价函数值出现一次下降, 则以中步长输出电流相反方向以小步长 S<sub>3</sub> 进行搜索, 并实时计算采样点评价函数值。

Step4: 如正焦点附近的小步长搜索, 出现一次下降就认为下降前一采样点 F 为正焦点位置, 同时整个自动调焦搜索过程结束。

该自适应变步长搜索策略在远离正焦点且容易出现局部极值的区域采用大步长搜索, 而液体变焦透镜驱动电流单调输出, 会使系统产生离焦-正焦-离焦的成像效果, 从而有效避免了由于局部极值引起的正焦点误判, 同时提高搜索速度。故 Step3、Step4 在正焦点附近只需判定有一次评价函数下降即往相反方向搜索。

## 3 图像增强算法

### 3.1 近红外成像特点

由于多光谱成像系统的折射率由光波长决定, 因此使得不同波段的最佳聚焦位置有所差异, 即在固定焦距下, 不同波段图像的清晰度会有所不同。尤其是近红外图像, 由于目标和背景之间的热辐射和热传递、近红外波长较长等固有特性, 使得近红外图

像产生噪声大、空间相关性强、对比度低、视觉效果模糊等现象<sup>[13]</sup>。针对这一问题,如果从光学系统调焦方面解决,需对每个波段的成像进行一次调焦处理,这样不仅使系统变得复杂,体积增大,且容易引起图像失配。事实上,这种现象是由色散引起的,离焦度较小,因此文中采用图像增强技术对近红外图像进行处理,这样不仅可以提高图像的视觉效果,而且成本低、易于操作,不增加系统复杂度及体积,还能尽量减少各波段图像的失配。

### 3.2 近红外图像增强方法

现有的近红外图像增强方法主要有空域及变换域两大类。前者主要包括灰度变换、直方图均衡化以及反锐化掩模,由于是对图像直接进行处理,所以速度较快,但也会在增强图像对比度的同时放大噪声,导致视觉效果不佳。相比之下,基于变换域的增强方法具有良好的信号与噪声分离特性,在图像增强领域得到了广泛研究,而其中的小波变换图像增强算法由于其良好的图像增强性能,在诸多领域被实际应用<sup>[14-15]</sup>。

但现有的小波变换图像增强算法对一些对比度较低、细节较模糊的近红外图像的增强效果并不是特别理想。因此,文中在参考文献[14]的基础上提出一种改进的二代小波变换方法对近红外图像进行增强,能够有效增强近红外图像对比度,提升亮度均匀性,改善视觉效果,同时为了对文中的增强效果进行量化,采用能反应图像对比度大小的灰度方差函数进行统计说明。图像增强具体的实现过程为:首先利用公式(6)对近红外图像进行小波正变换将图像分解,得到低频及高频分量,然后再分别对两种分量进行增强处理。

二代小波分解表达式为:

$$\begin{cases} g(2n+1)=w(2n+1)-\left\{\frac{1}{2}[w(2n)+w(2n+2)]\right\} \\ h(2n)=w(2n)-\left\{\frac{1}{2}[g(2n-1)+g(2n+1)+2]\right\} \end{cases} \quad (6)$$

二代小波重构表达式为:

$$\begin{cases} w(2n+1)=g(2n+1)+\left\{\frac{1}{2}[w(2n)+w(2n+2)]\right\} \\ w(2n)=h(2n)-\left\{\frac{1}{2}[g(2n-1)+g(2n+1)+2]\right\} \end{cases} \quad (7)$$

#### (1) 图像低频分量增强过程

近红外图像中低频部分表征了图像能量及对比度信息,故首先利用分段函数对低频分量进行增强处理,分段函数如下:

$$t_{ij}^* = \begin{cases} \alpha^* + \frac{\beta^* - \alpha^*}{\beta - \alpha} \times (t_{ij} - \alpha) & \alpha \leq t_{ij} < \varepsilon \\ \varepsilon^* + \frac{\delta^* - \varepsilon^*}{\delta - \varepsilon} \times (t_{ij} - \varepsilon) & \varepsilon \leq t_{ij} < \delta \\ \delta^* + \frac{\beta^* - \delta^*}{\beta - \delta} \times (t_{ij} - \delta) & \delta \leq t_{ij} < \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中: $t_{ij}$ 为增强前低频分量; $t_{ij}^*$ 则为增强后分量; $\varepsilon, \delta, \varepsilon^*, \delta^*$ 可根据需要进行调整; $\alpha, \beta$ 为输入的低频分量灰度范围。

为了使增强后的图像能弱化背景的影响,凸显主体的特性,并使图像效果符合人眼视觉系统的色感一致性,文中对线性分段后的低频分量进行多尺度映射增强,将公式(8)输出的低频分量映射到 $[0, 255]$ 的区间内,映射公式为<sup>[16]</sup>:

$$t_{ij}^{*a} = \frac{t_{ij}^* - t_{ijmin}^*}{t_{ijmax}^* - t_{ijmin}^*} \times 255 \quad (9)$$

式中: $t_{ij}^{*a}$ 为映射后结果; $t_{ijmax}^*, t_{ijmin}^*$ 分别为低频分量的极大值和极小值。

接着,把 $t_{ij}^{*a}$ 作为输入图像,按多尺度映射算法进行增强,表达式为:

$$t_{ijout}^{*a} = \sum_{n=1}^N w_n \{ \ln t_{ij}^{*a} - \ln [G_n(ij) * t_{ij}^{*a}] \} \quad (10)$$

式中: $N$ 为尺度数; $G_n(ij)$ 为环境高斯函数; $w_n$ 则为第 $n$ 个尺度的权重,且满足:

$$\sum_{n=1}^N w_n = 1$$

最后将多尺度增强处理后的低频分量线性映射回 $t_{ijmin}^* \sim t_{ijmax}^*$ 区间。经对低频分量增强后,可提高图像的对比度,改善图像质量,增强视觉效果。

#### (2) 图像高频分量增强过程

近红外图像经小波变换后,噪声主要存在高频分量中,为了尽量降低噪声的影响,首先,需先对高频分量进行去噪。文中采用软阈值函数进行去噪,表达式为

$$q_T(r_{ij}) = \begin{cases} 0 & |r_{ij}| < T \\ \text{sgn}(r_{ij}) \times (|r_{ij}| - T) & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中:阈值 $T = \sigma_n \sqrt{2 \log(N)}$ , $\text{sgn}(y)$ 为符号函数; $r_{ij}$ 为待处理高频分量; $\sigma_n$ 为噪声标准差; $N$ 为小波高频分量总数。

然后对去噪后的高频分量  $r_{ij}$  进行非线性模糊增强,采用的隶属度函数为:

$$z_{nm} = \frac{r_{ij} - t_n}{\max(r_{ij}) - t_n} \quad t_n \in [\min(r_{ij}), \max(r_{ij})] \quad (12)$$

隶属度函数非线性调整表达式为:

$$z_{nm}^* = K_r(z_{nm}) = K_r(K_{r-1}(z_{nm})) \quad r=1, 2 \quad (13)$$

其中

$$K_1(z_{nm}) = \begin{cases} z_{nm}^2 / u_o & 0 \leq z_{nm} \leq u_o \\ 1 - (1 - z_{nm})^2 / 1 - u_o & u_o \leq z_{nm} \leq 1 \end{cases}$$

公式(13)可根据需要调整  $u_o$  的大小获得最佳模糊增强效果。

最后,将增强后的低频分量及高频分量经过公式(7)小波重构即可得到增强后的近红外图像。

文中图像增强算法的实现过程如图 3 所示。

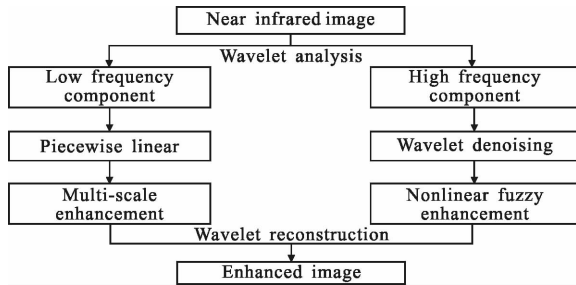


图 3 近红外图像增强算法流程图

Fig.3 Flow chart of NIR image enhancement algorithm

## 4 实验结果及分析

### 4.1 仿生视觉自动调焦算法验证

针对传统仿生系统一般采用定焦镜头,不能够实时调节焦距,也不能对目标物体进行放大及缩小的观测<sup>[17]</sup>,改进设计出基于液体透镜的仿生视觉实验系统,如图 4 所示。为验证文中清晰度评价函数评价性能,在 Intel Core i5-4590 3.30 GHz CPU,4 GB

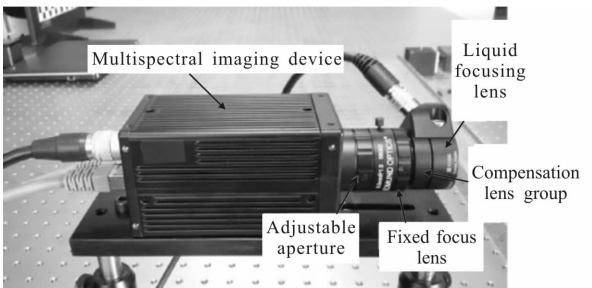


图 4 实验装置

Fig.4 Experimental device

内存,Win7 操作系统,Matlab 8.3 的计算机上将参考文献[1-2]中的算法与文中算法进行实验对比,实验数据为基于液体变焦透镜的多光谱成像系统可见光通道采集的像素为 640×480,由模糊-清晰-模糊组成的 24 张图像(其中第 12 幅是正焦图像)。

Matlab 生成评价函数曲线如图 5 所示。公式(3)中,  $m, n$  分别取 0.25 和 0.75。

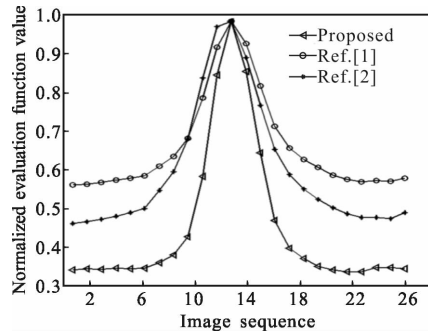


图 5 评价函数曲线

Fig.5 Evaluation function curve

由评价函数曲线可知,三种评价函数基本上都能形成有效的评价功能、满足无偏性、单峰性、灵敏性。但参考文献[1-2]算法的灵敏性不如文中算法,具体表现为:文中算法评价函数极值点两侧的坡更陡,这说明正焦点两侧的离焦图像评价函数值变化更明显,而这是评价函数具有较好灵敏性的表现形式。主要是因为文中评价函数在计算梯度时对像素不同方向的梯度分别赋予了不同权重,使评价指标更接近实际场景的图像信息。

另外,评价函数还需具备良好的抗噪性能,当图像中存在一些噪声时,评价函数仍能够相对准确的计算图像的清晰度。故在原始图像中加入均值 0,方差 0.01 的高斯噪声,进一步对比三种评价函数的抗干扰能力,评价结果如图 6 所示。

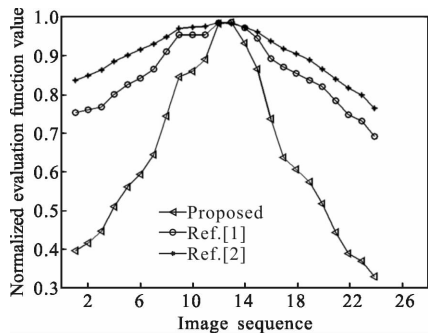


图 6 加噪后评价函数曲线

Fig.6 Evaluation function curve after adding noise

由加入噪声后的评价函数曲线可知,文中的评价函数具备较好的抗噪性能,加入噪声后的评价函数曲线仍然能够形成有效的判断,而另外两种评价函数受噪声的影响比较大,这主要是因为参考文献[1-2]中在计算评价函数时,只取了各像素一个方向的最大或最小梯度,实际上像素的梯度方向虽然未知,但各方向的梯度都占像素总梯度一定的比例,文中算法充分考虑了这一点,在计算图像灰度梯度时赋予像素点各方向梯度不同权重,能更为准确的计算图像清晰度,并且受噪声的影响更小。

最后为验证三种自动调焦算法的实际性能,在固定视场中对目标物体进行自动调焦实验,并统计调焦用时及正焦点对应的液体变焦透镜驱动电流大小,详细数据如表 1 所示。

表 1 自动调焦算法实验数据

Tab.1 Auto focusing algorithm experimental data

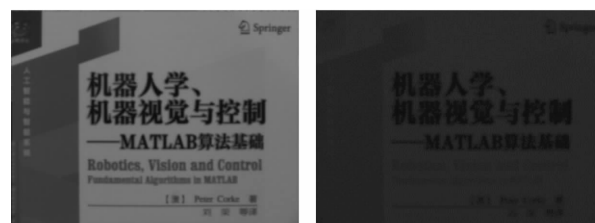
Focusing algorithm	Focusing time/ms	Drive current/mA
Ref.[1]	2 594	178.9
Ref.[2]	2 215	177.4
Proposed	756	176.8

表 1 中调焦用时均为进行一次自动调焦过程的总用时,包括采集图像、图像清晰度计算并确认极值、驱动液体透镜焦距变化 3 个进程的时间。从实验数据可以看出三种算法正焦点所对应的驱动电流相差不大,说明三种算法的有效性。但文中算法的调焦用时相比与其他两种算法更少,经分析主要是因为参考文献[1-2]中的评价函数需先将各像素与八邻域像素的最大及最小灰度梯度求出,算法中需进行多次排序判断,耗时较多。而文中算法只需将水平和垂直方向以及斜对角方向的梯度乘以权重系数,节

约了算法所需时间。同时文中使用的液体变焦透镜响应速度可达 2.5 ms,通过电流控制调焦步长,故在调焦过程中无需考虑传统镜片组合式变焦镜头产生的调焦过度时间,进一步提高了系统的调焦时效性及稳定性。

#### 4.2 仿生视觉图像增强算法验证

采用多光谱仿人眼视觉成像系统对目标物体进行自动调焦后观测,可知可见光与近红外图像之间清晰度存在不一致现象,如图 7 所示。



(a) 可见光图像 (b) 近红外图像  
(a) Visible light image (b) NIR image

图 7 多光谱成像图

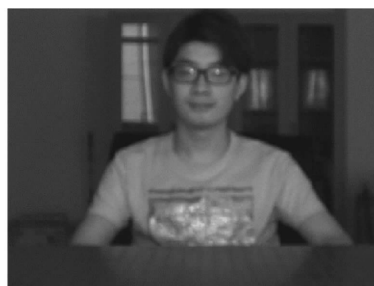
Fig.7 Image of multispectral

为检验文中图像增强算法对近红外图像对比度以及细节的实际增强效果,将算法与参考文献[14]中所述图像增强算法作对比实验,实际处理结果如图 8 所示。

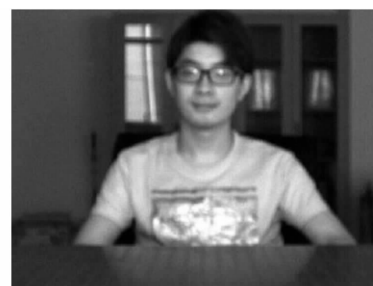
近红外原始图像(a)、(d)对比度较低、细节模糊,通过参考文献[14]所述图像增强算法,图 8(b)、(e)的对比度及视觉效果有一定的提高,但由于图像大部分仍然处于灰暗区域,目标内部的细节层次并不清晰,增强后也没有很好地区分目标及背景,达到最佳的增强效果。图 8(c)、(f)则是经文中图像增强算法处理过的效果,由实际图像信息可知文中算法在提高图像对比度的同时,使灰度级分布更加均匀,有效地保留了原图像的纹理细节信息,且没有产生饱和、噪



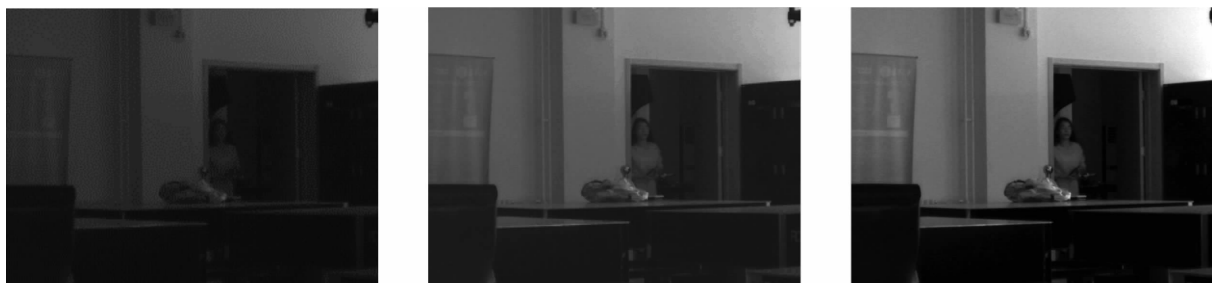
(a) 原始图像 1  
(a) Original image 1



(b) 参考文献[14]中算法 1  
(b) Algorithm 1 of Ref.[14]



(c) 推荐算法 1  
(c) Proposed algorithm



(d) 原始图像 2 (e) 参考文献[14]中算法 2 (f) 推荐算法 2  
 (d) Original image 2 (e) Algorithm 2 of Ref.[14] (f) Proposed algorithm 2

图 8 近红外图像增强效果

Fig.8 Result of NIR image enhancement

声放大等不良现象，有效地提高了近红外图像的识别能力及视觉效果。

为了能从客观上说明文中算法处理后的图像比原图及参考文献[14]中处理过的图像具有更好的对比度及细节，利用能反应图像对比度的灰度方差函数对以上 6 幅图求取灰度方差和，见表 2。

表 2 近红外图像增强处理前后灰度方差函数值  
 Tab.2 Gray variance function value before and after NIR image enhancement processing

Algorithm	Fig.8(a)	Fig.8(d)
Original image	872.2	748.5
Ref.[14]	2 551.9	2 360.1
Proposed	4 243.4	3 159.3

由表中数据可知，文中图像增强算法处理过的近红外图像灰度方差函数值相比于其他两种有了很大提高，证明其对比度及细节信息更加明显。

## 5 结 论

文中对仿人眼自适应调节的多光谱视觉图像处理方法进行研究，包括自动调焦及图像增强技术，文中从人类视觉系统能实现全局性观测及细节性观测出发，提出了一种基于可见光及近红外的多光谱视觉成像系统，实现对目标物体的全局及细节观测。自动调焦算法中采用一种改进的基于人类视觉特性的图像灰度梯度评价函数结合自适应变步长搜索策略使系统初步成像，并在基于液体变焦透镜的实验系统上验证自动调焦算法的性能，得到系统有效调焦

用时为 756 ms，相比一些现有算法在灵敏度及时效性方面有很大提高。同时，对多光谱成像系统中由于分光棱镜折射率不同导致的在固定焦距下，可见光和近红外图像清晰度有所不同的问题，采用改进的图像增强算法对近红外图像进行处理，使图像的恢复更加接近实际情况，改善人眼视觉效果，并通过实验检验文中近红外图像增强算法的实际效果，最后利用灰度方差函数对增强处理前后的图像进行灰度方差值计算，可知近红外图像增强后灰度方差函数值较原图像提高了 79.4%，有效地解决了近红外图像对比度低和细节模糊的问题，系统最终实现自适应调节。文中所做研究将为仿人眼视觉领域工程实现技术提供良好的借鉴。

## 参 考 文 献：

[1] Zhang Laixian, Sun Huayan, Guo Huichao, et al. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 605-610. (in Chinese)  
 张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 605-610.

[2] Mei Gui, Zhai Yan, Miao Jianyu, et al. Focal plane alignment and testing for an off-axis multispectral space borne camera[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 491-500. (in Chinese)  
 梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 星载离轴多光谱相机焦平面的装调与检测[J]. *中国光学*, 2016, 9(4): 491-500.

[3] Wu X, Hu S, Zhao J, et al. Analysis of comparative different methods for image enhancement [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(12): 4563-4570.

[4] Wang Hao, Zhang Ye, Shen Honghai, et al. Review of

- image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
- 王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438-448.
- [5] Xu Chao, He Limin, Wang Xia, et al. Design of high speed processing module for infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0204002. (in Chinese)
- 徐超, 何利民, 王霞, 等. 红外偏振成像系统高速处理模块设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0204002.
- [6] Wang Yeru, Feng Huajun, Xu Zhihai, et al. An adjustable coverage range autofocus evaluation function using gradient operator with on variable frequency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1028001. (in Chinese)
- 王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 一种覆盖范围可调的变频梯度自动对焦评价函数 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1028001.
- [7] Liu S, Liu M, Yang Z. An image auto-focusing algorithm for industrial image measurement [J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2016, 2016 (1): 70.
- [8] Qi Y, He R, Lin H. Novel infrared image enhancement technology based on the frequency compensation approach [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 18(76): 521-529.
- [9] Zhao Wenda, Xu Zhijun, Zhao Jian, et al. Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(7): 1962-1968. (in Chinese)
- 赵文达, 续志军, 赵建, 等. 基于梯度直方图变换增强红外图像的细节[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1962-1968.
- [10] Li Ke, Zhang Kangwei, Luo Miao. Design on optical system of large plane array and high resolution multi-spectral imager based on LCTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 675-679. (in Chinese)
- 李珂, 张康伟, 罗森. 基于 LCTF 的大幅面高分辨率多光谱仪光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 675-679.
- [11] Huang Detian, Liu Xuechao, Zhang Hongsheng, et al. Fast auto-focusing method based on human visual system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 768-776. (in Chinese)
- 黄德天, 刘雪超, 张红胜, 等. 基于人类视觉的快速自动调焦法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 768-776.
- [12] He Zhiyong, Sun Lining, Chen Liguu. Fast computation of threshold based on Otsu criterion [J]. *Acta Electronic Sinica*, 2013, 41(2): 267-272. (in Chinese)
- 何志勇, 孙立宁, 陈立国. Otsu 准则下分割阈值的快速计算[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 267-272.
- [13] Zhou Qiang, Zhao Jufeng, Feng Huajun, et al. Infrared image enhancement using polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 39-47. (in Chinese)
- 周强, 赵巨峰, 冯华君, 等. 基于偏振成像的红外图像增强 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 39-47.
- [14] Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian, et al. Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 353-356. (in Chinese)
- 秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾, 等. 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 353-356.
- [15] Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0209001. (in Chinese)
- 李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0209001.
- [16] Ge Wei, Li Guiju, Cheng Yuqi, et al. Face image illumination processing based on improved Retinex [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(4): 1011-1020. (in Chinese)
- 葛微, 李桂菊, 程宇奇, 等. 利用改进的 Retinex 进行人脸图像光照处理[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1011-1020.
- [17] Chu Xiang, Zhu Lianqing, Meng Xiaochen, et al. Quick focusing method in bionic vision based on the liquid lens [J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(2): 203-209. (in Chinese)
- 褚翔, 祝连庆, 孟晓辰, 等. 一种基于液体透镜的仿生视觉快速调焦方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 203-209.