

文章编号:1001-5078(2017)02-0203-07

· 光电技术与系统 ·

# 一种基于液体透镜的仿生视觉快速调焦方法

褚翔, 祝连庆, 孟晓辰, 娄小平

(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:** 为了提高仿生视觉系统中调焦方法的实时性, 在对基于液体透镜的仿生视觉系统调焦控制方式进行研究的基础上, 提出一种改进的快速调焦方法, 实现系统焦距快速调节的功能。首先将基于激光位移传感器的主动式调焦结果作为预正焦点的判断准则, 然后利用基于 Sobel 算子的灰度梯度评价函数并结合改进的爬山搜索算法对焦距进行精细调整, 最后搭建仿生视觉成像系统实验装置, 验证本文方法的准确性及实时性。结果表明, 利用提出的快速调焦方法, 在调焦过程中对同一场景不同模糊程度 24 帧图像的处理时间可以达到 257 ms, 相比于传统的自动调焦方法在速度上有很大提升。

**关键词:** 仿生视觉; 液体变焦透镜; 焦距; 快速调节

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.02.015

## Quick focusing method in bionic vision based on the liquid lens

CHU Xiang, ZHU Lian-qing, MENG Xiao-chen, LOU Xiao-ping

(Beijing Key Laboratory for Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to improve real-time focusing in the bionic vision system, an improved fast focusing method based on liquid zoom lens is proposed, which achieves fast adjustment of focal length. Firstly, the active focusing result based on laser displacement sensor is taken as pre-focal judgment criterion. Then the focal length of the system is finely adjusted through the gray gradient evaluation function based on Sobel operator and the improved climbing search algorithm. An experimental device of the bionic vision imaging system was built, and the accuracy and real-time of this focusing control method were verified. Results show that the processing time of this method for 24 images with different fuzzy scales under the same scene consumes only 257 ms in the process of focus adjustment, and this method has greatly improved the focusing speed compared with the traditional automatic focusing method.

**Key words:** bionic vision; liquid lens; focal length; quick adjustment

### 1 引言

传统的仿生视觉系统多是基于工学方法, 利用摄像机获得目标图像进行处理<sup>[1]</sup>。但这种摄像机

镜头一般采用定焦镜头, 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, 变焦透镜则可以实现这样的需求。变焦镜头从组成方式及工作

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)(No. 2015AA042308); 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(No. IRT1212); 北京市教委科研计划面上项目(No. KM201511232006)资助。

**作者简介:** 褚翔(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事仿生视觉自动调焦算法的研究。E-mail: chuxiangwy@126.com

**通讯作者:** 祝连庆(1963-), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为生物医学检测技术与仪器, 光电精密测试技术研究。

E-mail: zhulianqing@sina.com

**收稿日期:** 2016-05-12

原理上可以分为传统变焦距镜头以及液体变焦距镜头。传统镜片组合式变焦距镜头就是利用改变透镜组之间的间隔来实现焦距的变化,这种方式必须采用特殊驱动电机对独立组件的机械位置提供精准的控制,并且镜头内多个组件的动作必须保证同步,这对系统的机械结构提出了苛刻的要求,移动透镜组改变焦距时,往往也会伴随着像面的移动<sup>[2]</sup>。因此,还需对像面的移动进行补偿。近年来,随着变焦距镜头不断朝着微型化、智能化、稳定化、低功耗、成像质量高的方向发展,这种传统的调焦方式已经很难满足实际需求<sup>[3]</sup>。液体变焦距镜头是指通过模拟人眼晶状体变焦功能,以不同驱动方式改变透镜表面曲率,从而实现透镜焦距大小的变化。它避免了传统调焦系统结构复杂、易磨损和寿命低等缺点,可以实现传统光学元件难以完成的功能,推动调焦系统向小型化、灵巧化发展,可应用于手机、相机、摄像、显微镜、医疗领域、光学测试设备、光通信和光信息处理、仿生视觉等领域<sup>[4-6]</sup>。可以说,随着液体镜头的不断发展,它的应用将会更加广泛。同时,自动调焦技术一直以来都是仿生视觉成像系统应用的重要环节,常用的调焦方法主要有两种,即主动式测距法、被动式图像处理法。但是这两种方式的不足也很明显,测距法由于精度、体积限制了它在仿生视觉领域的应用,图像处理法则会因为外部环境的多样性和噪声干扰无法确保每次的调焦效果为最优。利用本文提出的调焦方法避免了主动测距法时效性不足以及基于图像的调焦方法可能出现的评价函数局部极值点误判。为基于液体透镜的仿生视觉系统提供了一种全新的快速调焦方法。

## 2 仿生视觉快速调焦系统

### 2.1 液体变焦距透镜工作原理

液体变焦距透镜是近些年出现的一种新型光学元件,它与传统的变焦距镜头不同,不仅调焦响应时间很快(一般十几毫秒),而且无需调整透镜组的间隔,只需要通过电流或电压驱动信号来控制液体的折射率或镜头表面曲率,从而实现焦距的调节<sup>[7]</sup>。

事实上,有关液体透镜的研究可归结为两大类:一类是渐变折射率透镜,另一类是曲率变化透镜,后者主要是基于电润湿效应及液体填充方式,本文使用的 Optotune 液体透镜为液体填充方式(图 1 所示)。

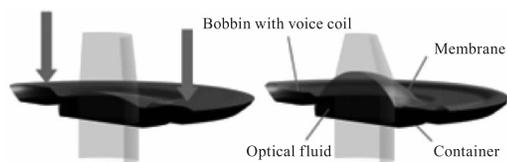


图 1 液体填充式透镜原理

Fig. 1 Working principle of liquid-filled lens

液体填充方式是使用光学透明弹性薄膜将液体限制在腔体当中,通过液体的压力来控制薄膜面形变化,透镜的光焦度(焦距倒数)由液体表面曲率和液体—空气两者折射率差来决定。

$$\varphi = \frac{1}{f} = \frac{n-1}{r} \quad (1)$$

式中, $f$ 为透镜焦距; $r$ 是透镜表面的曲率半径; $n$ 为液体的折射率。可变形弹性薄膜用于限制光学液体并在液体腔与外界的压力差下产生所需的面形。当光学液体被注入到液体腔时将产生一个正压力,弹性薄膜受到压力差作用将向外凸起,形成凸透镜;相反地,当光学液体从液体腔被抽出时,将产生负压力形成凹透镜,通过液体的进出控制腔内的压力,从而实现焦距的调节<sup>[8]</sup>。

### 2.2 快速自动调焦方法研究

现阶段基于液体透镜的调焦控制方式有手动调节以及基于图像算法两种方法,但这两种方法的不足也是非常明显的,前者由于实时性以及依靠人眼主观意识判断图像清晰度等缺点限制了该方法在仿生视觉领域的应用,后者由于目标物体场景的多样性,会导致图像清晰度评价函数存在局部峰值,因此在调焦算法上很难保证每次正焦点的判断是无误的,而且这种方式的时效性(大约 1 s)虽然比手动调节的方式有一些提高<sup>[9]</sup>,也很难满足仿生视觉想要实现类似人眼的快速调焦效果。

本文提出一种基于液体镜头的仿生视觉快速调焦方法,它同时结合 Optotune 液体镜头变焦迅速、平滑、成像质量高以及激光位移传感器高精度、工作稳定的特点,在调焦的实时性及稳定性上有了很大的提升。具体实现过程是:首先,通过精确的标定实验将激光位移传感器测得的各项数值进行分析处理,得出仿生视觉成像系统不同工作距离与液体变焦距所需调节信息之间的曲线关系,进一步得到曲线拟合方程式,调焦过程中利用此方程式使系统大步长快速调整到预正焦点。然后,在预正焦点附近利用基于图像

清晰度评价函数结合小步长极值搜索算法,使系统焦距快速达到正焦点,获取实时清晰图像,具体实现框图如图2。基于液体透镜的仿生视觉快速调焦系统包括:目标物体、位移传感器、控制系统、驱动器、液体变焦透镜、图像传感器以及支撑结构。

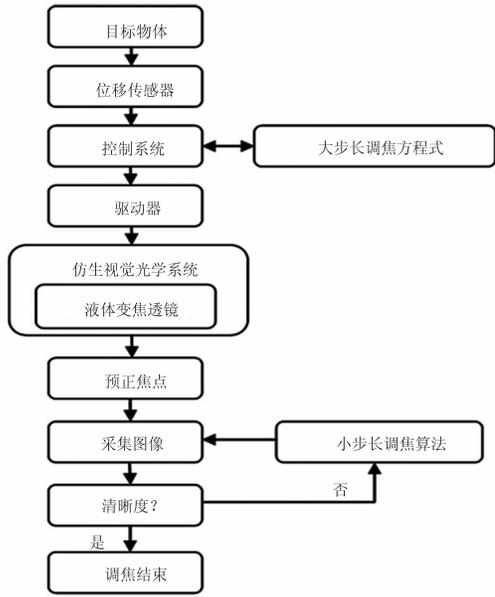


图2 仿生视觉快速调焦方法实现框图

Fig. 2 Framework of the Bionic vision quick focusing method

### 3 快速自动调焦方法理论分析

#### 3.1 大步长粗调焦过程

基于液体透镜的仿生视觉快速调焦方法的关键在于液体变焦透镜的实时控制,故本文的大步长粗调焦实现过程需建立物距-焦距-控制电流三者之间的关系。图3为光学成像简易模型。

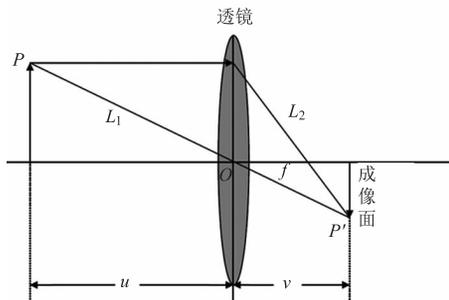


图3 透镜聚焦成像简易模型

Fig. 3 Simple lens focusing imaging model

图中,  $P$  为目标物体,  $P'$  为物体  $P$  经透镜成像的聚焦像,此透镜焦距为  $f$ ,  $P$  点与透镜中心的垂直距离为  $u$ , 聚焦像点  $P$  距透镜中的距离为  $v$ , 透镜光学成像公式如下:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (2)$$

目标物体在成像面为一幅聚焦像,根据式(2)即可得物距为:

$$u = \frac{v \cdot f}{v - f} \quad (3)$$

由上式可知物距与系统的像距、焦距有关。液体变焦透镜的控制方式为电流驱动,透镜内部含有光学补偿透镜组,经理论分析及研究,可经过实验得到物距与液体透镜驱动电流之间的关系曲线,通过实时的物距信息,驱动液体透镜使其焦距进行变化,快速达到系统预正焦点,从而对不同远近的目标物体进行成像。这种大步长调焦方法能避免远离正焦点区域局部极值所造成的干扰以及全局基于图像的自动调焦算法中需进行多次评价函数判别确定系统预正焦点存在的时效性不足等缺点,极大地提高了预正焦点搜索速度,两种方式的对比如图4所示。

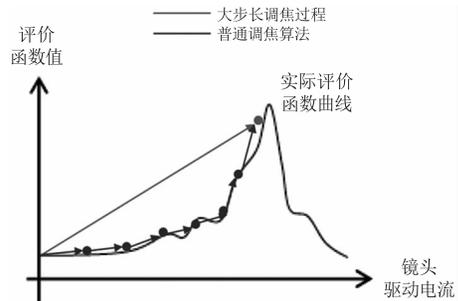


图4 大步长粗调焦过程

Fig. 4 The process of large step rough focusing

#### 3.2 小步长细调焦过程

当系统焦距到达预正焦点之后,需要根据实时成像清晰度对焦距做局部精细调整,基于图像的自动调焦算法大致可以分为灰度梯度函数、灰度熵函数、频谱类函数和统计学函数等<sup>[10-12]</sup>。图5是常用几种方法对一组图片(21帧)数据进行计算的评价函数曲线图,其中横坐标为图像序列,纵坐标为评价函数归一化值。

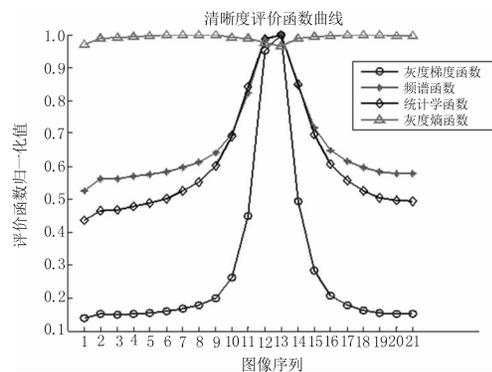


图5 几种常见评价函数对比

Fig. 5 Several common evaluation functions

通过对比图可知,四种模型均可实现评价功能,但第一种模型评价效果较好。其中,灰度熵函数易受外界环境的影响,灵敏度低,容易引起焦点的误判;频谱函数灵敏度高,但计算量大,难以满足实时性要求;统计学函数则是通过分析图像的灰度值变化情况来区分已对焦的图像与未对焦的图像,对环境稳定性要求较高;相比而言,清晰的图像比模糊的图像具有更丰富的边缘,而正焦的图像比离焦的图像清晰,因此可用灰度梯度函数来提取图像的边缘<sup>[13-14]</sup>,而且,梯度函数易于实现,实时性比三者好,可根据不同的调焦范围选择不同的梯度函数。其中,基于 Sobel 算子的灰度梯度函数峰顶宽度相对较窄,灵敏度高,稳定性好,适合于小范围精确调焦,本文采用这种方式建立小步长精细调清晰度评价函数,它先利用 Sobel 算子提取图像水平方向和垂直方向的梯度,再计算梯度的平方和。由于 Sobel 算子的权值通过增加中心点的重要性而实现某种程度的平滑效果,因此该函数不仅能较好地提取图像细节信息,还具有一定的噪声抑制能力,其具体函数为:

$$F_{sob} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f_x^2(x,y) + f_y^2(x,y)] \quad (4)$$

式中,  $f_x(x,y)$  和  $f_y(x,y)$  分别表示图像矩阵与垂直方向和水平方向 Sobel 算子的卷积;  $\otimes$  表示卷积符号。

$$f_x(x,y) = f(x,y) \otimes w_2 \quad (5)$$

$$f_y(x,y) = f(x,y) \otimes w_1$$

其中  $w_1$  为水平模板;  $w_2$  为垂直模板。

$$w_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$w_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

事实上,图像局部清晰度评价函数曲线理论上应该成单峰性。系统根据实时图像信息,采用调焦搜索方法对评价函数极值点进行搜索,常用的调焦搜索方法有 Fibonacci 搜索法、黄金搜索法、函数逼近搜索法以及爬山搜索法<sup>[15]</sup>。本文采用一种改进的爬山搜索算法小步长精细调整系统焦距,此搜索算法的实现过程为:根据液体变焦透镜驱动电流最小步长从预正焦 A 点沿着调焦曲线向上(或向下)运动搜索评价函数极值点,当出现连续三个评价值下降则认为第一个下降点的前一个位置为最佳极值点(B点),从而确定正焦点所对应的电流值,实时

获取最佳清晰图像。这种方法无需在全局内对正焦点进行搜索判断,同时可避免在两个调焦小步长内出现的局部峰值,有效排除正焦点附近区域内的局部极值和干扰带来的误判断,使系统能准确可靠地实现精细调焦,过程如图 6 所示。

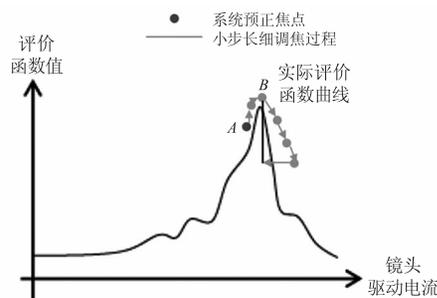


图 6 小步长精细调焦过程

Fig. 6 The process of small step fine focusing

## 4 实验及结果分析

### 4.1 标定实验

基于液体透镜的仿生视觉标定实验系统如图 7 所示。系统包括仿生视觉成像装置(它由液体变焦透镜、12 mm 定焦镜头、工业相机、C/S 转接环组成)、激光位移传感器、靶标、位移尺、支撑结构、光学实验平台等。为保证实验结果的准确性,实验过程中须确保采集图像时外部环境一样,降低客观因素对实验精度的影响。

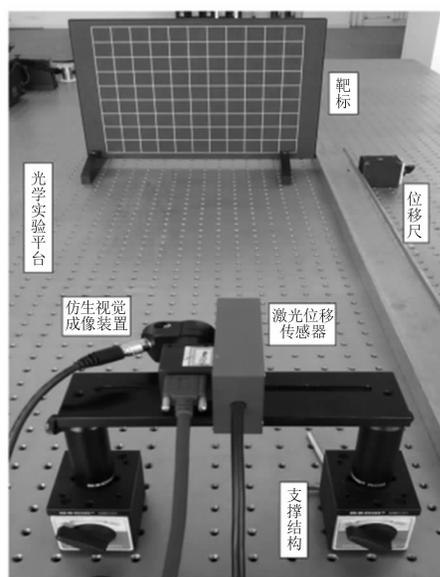


图 7 标定实验系统实物图

Fig. 7 Physical map calibration experiment system

经标定实验建立目标物体距离与系统清晰成像时液体变焦透镜驱动电流两者之间对应关系,标定实验原理如图 8 所示。通过实验数据得到拟合曲线方程式,控制系统通过此方程式实现大步长调焦过程。系统预正焦点判别的实际准确性依赖于标定实验中

物距步长值以及驱动电流刻度值的选取(本标定实验物距步长为 50 mm、驱动电流刻度为 0.07 mA)。

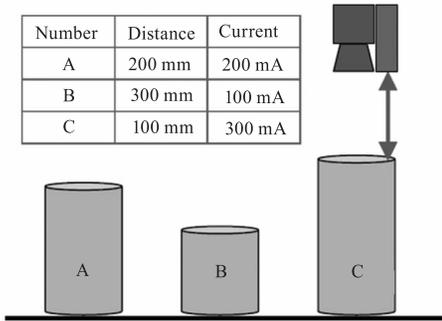


图8 标定实验原理图

Fig. 8 The principle of calibration experiment

按标定实验步骤得到表 1 实验数据。

表 1 系统工作距离与驱动电流对应数据表

Tab. 1 System working distance and the liquid lens drive current corresponding data table

工作距离 /mm	驱动电流 /mA	工作距离 /mm	驱动电流 /mA	工作距离 /mm	驱动电流 /mA
∴	∴	900	197.38	1550	155.41
300	287.30	950	191.53	1600	154.19
350	279.41	1000	186.79	1650	152.31
400	270.77	1050	181.36	1700	150.34
450	262.01	1100	177.42	1750	148.32
500	253.14	1150	174.31	1800	147.12
550	242.23	1200	170.36	1850	146.23
600	235.74	1250	167.37	1900	145.39
650	226.42	1300	165.45	1950	144.58
700	220.78	1350	163.56	2000	143.71
750	212.31	1400	160.17	2050	142.49
800	207.45	1450	159.17	2100	141.78
850	203.46	1500	157.56	∴	∴

通过对实验数据分析及处理,可得到图 9 所示拟合曲线,并生成相应的方程式。

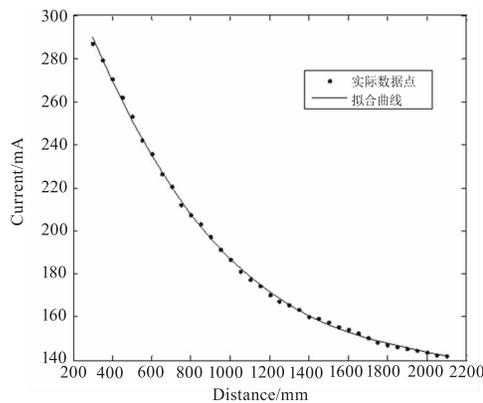


图9 工作距离与驱动电流关系曲线

Fig. 9 Working distance and the drive current curve

方程式如下:

$$f(x) = p_1 \times x^3 + p_2 \times x^2 + p_3 \times x + p_4 \quad (4)$$

式中,  $f(x)$  为驱动电流大小;  $x$  为系统可变工作距离,分别为常数(本标定实验中参数  $p_1 = -2.165 \times 10^{-8}$ ,  $p_2 = 0.0001327$ ,  $p_3 = -0.2899$ ,  $p_4 = 365.7$ )。针对基于液体变焦透镜的仿生视觉成像系统,在实验中通过上述控制方程可使系统快速到达预正焦点,提高系统调焦时效性。

#### 4.2 快速调焦方法系统成像效果及分析

仿生视觉成像系统集成大步长调焦方程式及小步长改进调焦算法,对前方 650 mm 目标物体成像,实时采集图像效果如图 10 所示。

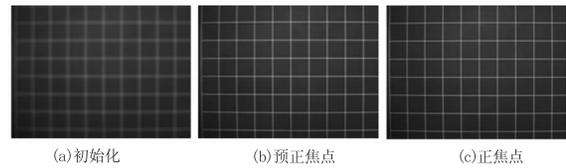


图10 系统实际成像图

Fig. 10 System actual imaging figure

由实际成像效果可知,系统初始化时处于深度离焦状态(如图 10(a));之后通过大步长粗调控制方程得到对应的液体变焦透镜驱动电流,发送指令使调焦执行机构快速达到预正焦点(如图 10(b)),由图像可知预正焦点时的实际成像效果已经非常接近正焦点。最后,系统采用基于图像的小步长精细调焦算法确定正焦点(如图 10(c))。将基于多种算子的灰度梯度评价函数与本文提出的仿生视觉快速调焦方法分别对同一场景下成像系统采集的不同模糊程度的 24 帧图像进行清晰度评价,统计相应函数运行时间,各种评价函数曲线如图 11 所示。

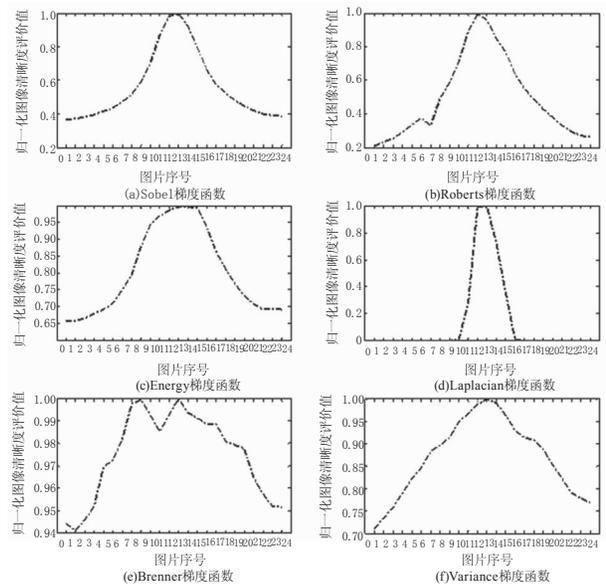


图11 不同灰度梯度调焦评价函数曲线图

Fig. 11 Different gray gradient focusing evaluation function curve

其中,预正焦点为第 12 帧图像,结果表明,基于不同算子的灰度梯度评价函数在实际调焦过程中平均耗时不同,通过表 2 可知利用本文提出的快速调焦方法相比于其他的自动调焦算法在速度上有很大的提升。

表 2 各种调焦评价函数与本文方法对 24 帧图像运算耗时比较

Tab. 2 Variety of focusing evaluation function and suggested method required time operations on 24 frames

调焦评价函数	耗时/ms
Sobel 函数	917.76
Roberts 函数	819.23
Energy 函数	802.47
Brenner 函数	770.25
Laplacian 函数	1256.35
Variance 函数	1350.24
本文方法	256.95

通过以上实验论证,本文提出的快速调焦方法在速度上有很大的提升,同时光学成像系统的体积也有了很大的改善。系统中采用 Optotune 液体透镜作为调焦执行机构,它的动态响应时间为 2.5 ms、调焦范围为(-1.5 dpt, +3.5dpt)、折射率为 1.30、尺寸 48 mm × 30.5 mm,激光位移传感器作为大步长粗调焦控制方程数据来源,它的测量精度为 ±2 mm,这确保了标定实验的精确度,同时也提高了本文调焦方法的准确性及实时性。

## 5 结 语

本文首先介绍仿生视觉的发展现状并对其调焦控制方式进行了分析及研究,提出了一种基于液体透镜的仿生视觉快速调焦方法。其次,对这种快速调焦方法进行了说明,包括实现方式及关键技术点。最后,通过实验对不同距离的目标物体成像并验证快速调焦方法的实时性,实验结果表明,整个系统的工作距离可以达到无穷远处且成像清晰,满足了仿生视觉的基本要求。本文提出的仿生视觉快速调焦方法在调焦过程中对同一场景不同模糊程度的 24 帧图像处理时间可以达到 257 ms,比大多数运用传统机械调焦方式和全局基于数字图像的调焦方式有了很大的提升,提高了系统的工作效率,满足实时成像的需求。

## 参考文献:

- [1] MAO Xiaobo, CHEN Tiejun. Study of the Bionic machine vision[J]. Computer Applications Technology, 2008, 10: 2903 - 2905, 2910. (in Chinese)  
毛晓波,陈铁军. 仿生型机器视觉研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 10: 2903 - 2905, 2910.
- [2] ZHANG Ying, ZHANG Xin, SHI Guangwei, et al. Liquid lens applied in focusable system [J]. China Optics, 2013, 6(1): 46 - 56. (in Chinese)  
张鹰,张新,史广维,等. 液体透镜在变焦系统中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 46 - 57.
- [3] SHI Guangfeng, YANG Bin, SHI Guoquan, et al. Development of high-speed zoom liquid lens [J]. Infrared Technology, 2014, 36(10): 777 - 786. (in Chinese)  
石广丰,杨彬,史国权,等. 高速变焦液体透镜的发展动态综述[J]. 红外技术, 2014, 36(10): 777 - 786.
- [4] Marks R, Mathine D L, Peyman G, et al. Adjustable fluidic lenses for ophthalmic corrections [J]. Opt. Lett, 2009, 34(4): 515 - 517.
- [5] Wippermann F C, Schreiber P, Bruer A, et al. Bifocal liquid lens zoom objective for mobile phone applications [J]. SPIE, 2007, 6501: 650109 - 1 - 650109 - 9.
- [6] W B Thoreson, S C Mange. Lateral interactions in the outer retina [J]. Progress in Retinal and Eye Research, 2012, 31(5): 407 - 441.
- [7] ZHANG Xiangxiang. Auto focus technology of the microscope that base on liquid lens [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 10: 37 - 42. (in Chinese)  
张翔翔. 基于液体透镜的显微镜自动调焦技术[J]. 光电工程, 2015, 10: 37 - 42.
- [8] ZHENG Ying. Study of the varifocal optical system based on liquid lens [D]. Beijing: Graduate university of Chinese academy of sciences, 2012. (in Chinese)  
张鹰. 基于液体透镜的变焦距光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [9] SUN Jie, YUAN Yuehui, WANG Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in auto focusing criterion [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 35 - 39. (in Chinese)  
孙杰,袁跃辉,王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 35 - 39.
- [10] JIA Xiaofei, LI Yibin, CHEN Dezhi, et al. Design of high speed arithmetic of auto focus in uncooled infrared thermal equipment [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(6): 688 -

690. (in Chinese)  
贾晓飞,李宜斌,陈德智,等. 非制冷红外热像仪的快速自动调焦算法设计[J]. 激光与红外,2009,39(6): 688 - 690.
- [11] JIN Xue, MA Weihong. Study on image definition evaluation function in auto focus process [J]. Optical Instruments, 2012, 34(1): 59 - 64. (in Chinese)  
金雪,马卫红. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 59 - 64.
- [12] SHAO Changfan, LIU Bingqi, HUANG Fuyu, et al. autofocusing evaluation function based on the multidirectional maximum gradient threshold [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(1): 115 - 118. (in Chinese)  
邹昌帆,刘秉琦,黄富瑜,等. 基于多向最大梯度阈值的自动调焦评价函数[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 115 - 118.
- [13] BAO Getang, ZHAO Hui, TAO Wei. Algorithm's study on automatic focusing for image measurement technology [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(1): 121 - 124. (in Chinese)  
鲍歌堂,赵辉,陶卫. 图像测量技术中几种自动调焦算法对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(1): 121 - 124.
- [14] MO Chunhong, LIU Bo, DING Lu, et al. A gradient threshold autofocus algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 323 - 327. (in Chinese)  
莫春红,刘波,丁璐,等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 323 - 327.
- [15] XIE Xiaohua. Software design and implementation of automatic focus at the wind tunnel photoelectric measuring system [D]. Chengdu: University of electronic science and technology, 2013. (in Chinese)  
谢小华. 风洞光电测量系统自动调焦软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.