

文章编号 1004-924X(2011)10-2326-07

## 变焦跟踪曲线在对焦中的应用

罗 钧\*, 孙 力, 闵志盛

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 在变焦成像系统中, 及时准确地获取跟踪曲线是变焦跟踪的关键, 因此, 本文提出了一种计算变焦跟踪曲线的策略。首先, 采用基于 RAW 格式图像的梯度算子计算实时图像清晰度; 然后, 拟合记录的变焦电机和对焦电机的位置关系, 得到远物距端和近物距端的两条跟踪曲线, 构成变焦跟踪曲线的上下边界; 最后, 结合几何法和自适应法, 应用获取的变焦跟踪曲线上下边界, 计算得到系统所处物距下的跟踪曲线。在自主开发的变焦成像系统中采用梯度算子获取了变焦曲线的上下边界, 并通过上述策略实现了变焦跟踪, 得到了变焦过程中的图像。实验结果表明, 使用所述算法的变焦成像系统其图像清晰度比只用自动对焦算法提高了 30% 以上; 将变焦跟踪曲线应用在对焦中, 能够提高变焦过程的图像对焦质量。

**关键词:** 变焦系统; 跟踪曲线; 变焦跟踪

**中图分类号:** TB853.1    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2326

## Application of zoom tracking curves in focusing

LUO Jun\*, SUN Li, MIN Zhi-sheng

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System,  
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

\* Corresponding author, E-mail: luojun@cqu.edu.cn

**Abstract:** It is most critical to acquire exact trace curves in time for realizing the zoom tracking in zoom imaging systems. Therefore, a novel computation strategy for zoom tracking curves is proposed. First, a real-time in-focus point is computed by using an image sharpness evaluation operator based on RAW format. Then, the position relations between zoom motor and focus motor are fitted to acquire the two trace curves at the near end and far end of object distances, which are regarded as the upper and lower bounds of trace curves. Finally, both geometric and adaptive zoom tracking methods are combined to be a hybrid algorithm to acquire the curves at some object distances by the method of interpolation. The trace curves for upper and lower bounds are obtained by a gradient operator on a self-developed zoom imaging system, zoom tracking is implemented with acquired trace curves and the image during zoom tracing is acquired. The obtained results show that the image quality of imaging system using proposed approach is improved by 30% as compared with that of the traditional system. It demonstrates that zoom tracking curves can be applied in focusing, and the image quality is improved dur-

**收稿日期:** 2011-03-01; **修订日期:** 2011-04-02.

**基金项目:** 国防科工委国防军工计量“十一五”计划重点项目(No. B20301118); 重庆市信息产业局科技攻关基金资助项目(No. 200113013)

ing zoom tracing.

**Key words:** zoom system; trace curve; zoom tracking

### 1 引 言

随着变焦镜头的广泛使用,变焦跟踪技术已经成为数码相机的一个重要功能,并广泛应用于工业检测、军事安全以及生活休闲等诸多方面<sup>[1-2]</sup>。变焦跟踪是指在进行变焦操作时,通过变焦镜头的移动来改变系统的焦距,由于系统的焦距发生变化,所成的像将不会聚焦在原来的对焦点上,所以在变焦镜头移动的同时需要通过调整对焦镜头的位置,使景物能在变焦过程中聚焦在图像传感器上。实现变焦跟踪的方法主要有查表法、几何变焦跟踪法、自适应变焦跟踪法等,其核心都是获取变焦跟踪曲线并控制对焦镜头运动<sup>[3]</sup>。无论是查找表法、几何法还是自适应变焦跟踪法,都需要有准确的变焦跟踪曲线来控制对焦镜头移动,所以一个变焦成像系统要实现变焦跟踪,必须获取准确的变焦跟踪曲线<sup>[4]</sup>。

传统的变焦跟踪曲线的获取方法主要有两种:一种是利用自动对焦算法逐点求出不同物距下的跟踪曲线,该方法计算量大,而且对相机的存储空间占用多;另一种是根据镜头组的光学位置关系用几何光学知识推算出不同物距下的变焦跟踪曲线,但该方法应用于相机系统中会由于存在机械误差等因素降低变焦跟踪的质量<sup>[3,5-8]</sup>。此外,当变焦电机从广角端向远角端移动时,传统的查表法使得系统很难选择到适当的跟踪曲线。本文提出了一种新的变焦跟踪曲线获取算法,该方法通过使用基于原始图像数据的梯度算子计算图像清晰度值,获取远物距端和近物距端两条跟踪曲线,构成变焦跟踪曲线的上下边界。将几何变焦跟踪算法和自适应变焦跟踪算法相结合,计算得到其它物距下的变焦跟踪曲线。

### 2 变焦镜头结构及变焦跟踪曲线

通常变焦镜头的光路如图 1 所示,它由 3 个镜头组单元构成,分别是 1G 单元、2G 单元和 3G

单元,其中前两个单元起变焦作用,称为变焦镜头,3G 单元起对焦作用<sup>[9-11]</sup>,称为对焦镜头。

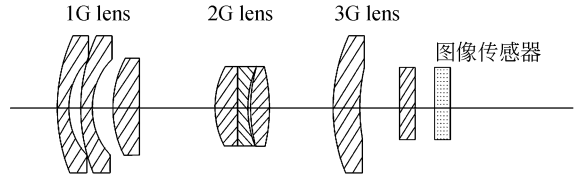


图 1 变焦镜头的光路图

Fig. 1 Optical flow of zoom lenses

变焦操作是通过变焦电机调节凸轮机构来改变变焦镜头的组合焦距  $f$ ,在物距不变的情况下,若要物体在图像传感器上成清晰的像,便需要调节像距来满足成像公式。由于图像传感器的位置不易改变,所以一般通过对焦电机改变对焦镜头位置来实现对焦。这样,每调节一次变焦镜头的组合焦距,便对应了一个唯一确定的对焦点。

在变焦成像系统中,当进行变焦操作时,变焦镜头的焦距发生变化,镜头组最终的对焦点将不会在图像传感器上,为了保持对焦点与图像传感器共面,必须控制对焦电机根据变焦跟踪曲线进行实时移动。变焦跟踪曲线就是在一定的物距下,变焦电机与对焦电机的位置关系曲线,不同物距下的景物具有不同的跟踪曲线。图 2 便是从光学系统上分析不同物距  $d_k$  下的变焦曲线的示意图。

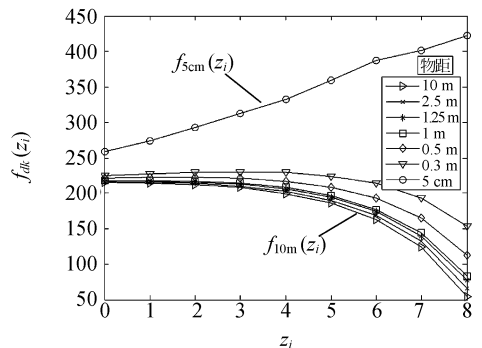


图 2 变焦跟踪曲线

Fig. 2 Zoom tracking curve

### 3 变焦跟踪曲线的计算模型

透镜成像公式(1)中  $f$  是镜头的组合焦距,  $d$  是物距,  $v$  是像距。  $d$  确定时, 当系统的  $f$  变化, 即应改变相应的  $v$ , 从而保证系统成像。 而变焦镜头的焦距  $F_{z_i}$  是随变焦电机位置  $z_i$  而改变的, 所以当变焦电机位置发生变化时, 需要改变系统的像距  $v$ 。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{v}. \quad (1)$$

因为在变焦系统中图像传感器的位置是固定的, 所以可通过调整对焦电机位置  $f_{d_k}(z_i)$  来调整物距  $v$ 。 变焦跟踪曲线显示了在给定物距下, 变焦电机位置  $z_i$  和对焦电机位置  $f_{d_k}(z_i)$  之间的关系。

要获取变焦跟踪曲线首先需要确定物距, 然后根据变焦电机的位置来移动对焦电机, 并通过图像清晰度函数<sup>[12-15]</sup>计算其清晰度, 从而找出对焦点并记录此时对焦电机的位置。

本文所述的变焦曲线获取算法由两部分组成: 1、图像清晰度计算模型; 2、计算变焦跟踪曲线。

#### 3.1 图像清晰度的计算模型

数码相机的图像传感器输出的图像数据是 RAW 格式数据, 如果直接对 RAW 格式图像进行操作, 则可以减少插值等算法的计算量, 同时还避免插值引入的噪声。 所以本文采用梯度算子直接对 RAW 格式图像操作来计算图像的清晰度值。 式(2)为所采用的梯度算子, 通过该模型计算的图像清晰度值在本文实验及结论部分给出。

$$E_{f_{d_k}(z_i)}(z_i) = \sum_{i=1}^{M_1-1} \sum_{j=1}^{M_2-1} \{ [f(i+1, j) - f(i, j)]^2 + [f(i, j+1) - f(i, j)]^2 \}, \quad (2)$$

其中  $E_{f_{d_k}(z_i)}$  表示变焦电机位置为  $z_i$ , 对焦电机位置为  $f_{d_k}(z_i)$  时所得的图像的清晰度值,  $f(i, j)$  是指坐标  $(i, j)$  处的 RAW 格式数据单元的灰度值,  $M_1, M_2$  是指所取窗口的宽度和高度。

#### 3.2 变焦跟踪曲线的上下边界获取

在物距  $d_k$  下, 根据变焦电机位置  $z_i$  调整对焦电机位置  $f_{d_k}(z_i)$ , 并根据式(2)计算实时图像清晰度值  $E(z_i)$ , 当清晰度值为最大值  $E_{\max}(z_i)$  时

记录下对焦电机位置  $f_{d_i}(z_i)$ , 此时变焦电机位置和对焦电机位置对应的点  $(z_i, f_{d_k}(z_i))$  就是变焦跟踪曲线上的点。 按上述方法记录该物距下变焦电机可调范围内每一步对应的对焦电机位置, 即  $f_{d_k}(z_1), f_{d_k}(z_2) \cdots f_{d_k}(z_N)$ 。 再利用最小二乘法将其拟合为变焦跟踪曲线, 这样即获得了  $d_k$  下的变焦跟踪曲线。

根据几何变焦跟踪法和自适应变焦跟踪法可知, 只需获取近物距和远物距处的两条跟踪曲线即  $F_{d_{\text{near}}}(z)$  和  $F_{d_{\text{far}}}(z)$ , 便可以由跟踪曲线估计公式估计出其它物距下的跟踪曲线。 所以本文利用上述方法获取近物距和远物距处的两条跟踪曲线存于相机 ROM 中待应用。

#### 3.3 变焦跟踪算法

所述算法获取的变焦跟踪曲线只有两条(即近物距和远物距下的两条曲线), 在变焦跟踪时就利用这两条曲线以及实时的变焦电机位置来估计所在物距下的跟踪曲线。 由几何变焦跟踪法获得跟踪曲线的估计函数  $\hat{F}_d(z_i)$ , 对于物距为  $d$  的被摄物, 跟踪曲线方程可以表示为式(3):

$$\hat{F}_d(z_i) = \begin{cases} F_d^{f_{\text{start}}}(z_{\text{initial}}) & z = z_{\text{initial}} \\ \left( \frac{F_d^{f_{\text{start}}}(z_{\text{initial}}) - F_{d_{\text{far}}}(z_{\text{initial}})}{F_{d_{\text{near}}}(z_{\text{initial}}) - F_{d_{\text{far}}}(z_{\text{initial}})} \right) \times [F_{d_{\text{near}}}(z_i) - F_{d_{\text{far}}}(z_i)] + F_{d_{\text{far}}}(z_i) & z \neq z_{\text{initial}} \end{cases}, \quad (3)$$

这里  $F_{d_{\text{near}}}(z_i)$  和  $F_{d_{\text{far}}}(z_i)$  指变焦电机位置为  $z_i$  时对应的对焦电机位置。  $z_{\text{initial}}$  和  $F_d^{f_{\text{start}}}(z_{\text{initial}})$  指物距为  $d$  时初始变焦电机的位置和相应对焦电机的位置。

采用式(3)可以获得不同物距下的变焦跟踪曲线。 然而在变焦电机从近物距到远物距运动时, 即到达跟踪曲线的线性区和非线性区的交界处的时候, 变焦电机和对焦电机位置不是线性对应的, 往往变焦跟踪曲线和物距会发生错误映射, 从而造成系统对焦不准, 所以需要有一个校正的过程来防止这种错误映射。 式(4)增加了变焦和对焦电机位置的判断, 来校正是否采用了准确的变焦跟踪曲线。

$$\begin{cases} z_{\text{initial}} = z_b \\ F_d^{f_{\text{start}}}(z_{\text{initial}}) = F_d^{f_{\text{boundary}}}(z_b) \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $F_{d_{\text{near}}}(z)$  和  $F_{d_{\text{far}}}(z)$  分别表示存储于相机中

的近物距和远物距的跟踪曲线。

### 4 实验结果

本文在 TM320DM6446、CCD 图像传感器和变焦镜头构成的变焦数码相机平台上对提出的变焦跟踪曲线获取算法进行了验证。实验将对焦电机和变焦电机对应的位置分为 18 个区域。利用提出的清晰度计算模型对变焦电机和对焦电机的位置做二维的扫描并计算出各个位置的清晰度值。在本系统中,5 m 和 50 cm 分别为远物距端和近物距端。在这两种物距下,变焦电机和对焦电机对应位置处获得的图像清晰度值分别如图 3 和图 4 所示。

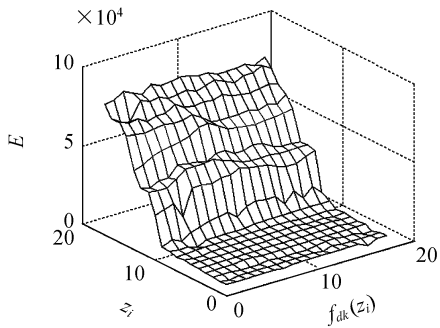


图 3 物距为 5 m 时的清晰度扫描图

Fig. 3 Scanning figure with object distance of 5 m

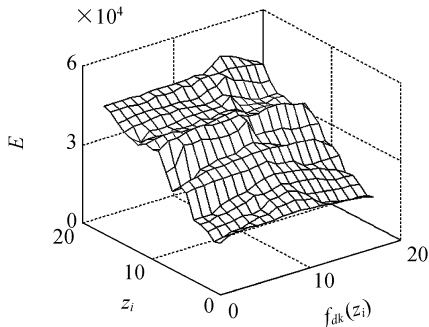


图 4 物距为 50 cm 时的清晰度扫描图

Fig. 4 Scanning figure with object distance of 50 cm

从清晰度扫描图中可以看出在远物距下图像清晰度值变化较大,而近物距下的图像清晰度值变化较小。变焦操作中,不同的物距条件下成像的视场变化不一样。近物距下的视场变化小,图像的复杂度变化也相对较小,因此清晰度值变化

很小;远物距下的视场变化较大,图像复杂度变化较大,故清晰度变化大。在获得图像清晰度值的同时,利用爬山搜索算法<sup>[16-17]</sup>获取在一定物距和变焦电机位置下清晰度最高的图像,并记录此时对焦电机的位置,这样就可以获得不同物距和不同变焦电机位置下对应的对焦电机位置。

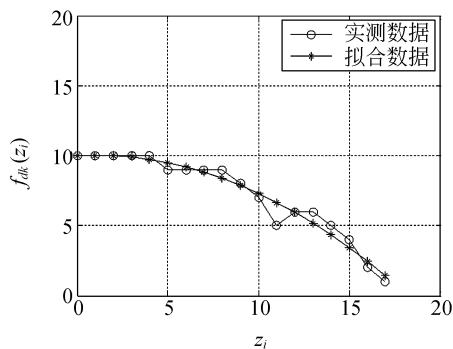


图 5 物距为 5 m 时的变焦跟踪曲线

Fig. 5 Zoom tracking curve with object distance of 5 m

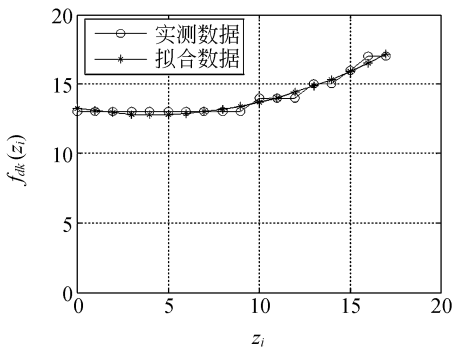


图 6 物距为 50 cm 时的变焦跟踪曲线

Fig. 6 Zoom tracking curve with object distance of 50 cm

将同一物距下的这些对焦电机位置点拟合成曲线,即为该物距下的变焦跟踪曲线。图 5 和图 6 就是由此获得的物距分别为 5 m 和 50 cm 时的变焦跟踪曲线。从中可以看出,实际测试得到的曲线与理论上光学系统的变焦跟踪曲线(图 2)基本吻合。根据获取的跟踪曲线上边界,通过几何法与自适应法的结合可以插值得到其它物距下跟踪曲线。图 7 为插值得到的物距 1 m 时的变焦跟踪曲线。

最后将获得的变焦跟踪曲线数据存入相机的 ROM 中,利用前面提到的变焦跟踪算法,对物距

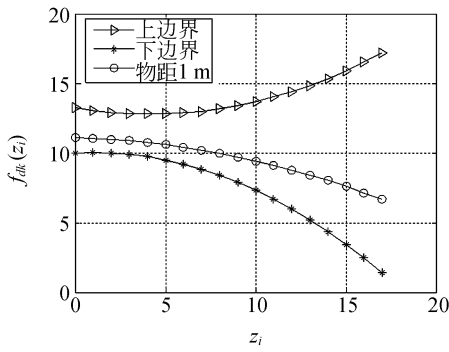


图 7 物距为 1 m 时的变焦跟踪曲线

Fig. 7 Zoom tracking curve with object distance of 1 m

分别为 5 m 和 50 cm 处的目标图像分别进行成像。



图 8 使用所述变焦跟踪曲线对焦图像(物距为 5 m)

Fig. 8 Zoom tracking with obtained trace curves in object distance of 5 m



图 9 未使用所述变焦跟踪曲线对焦图像(物距为 5 m)

Fig. 9 Zoom tracking without obtained trace curves in object distance of 5 m

图 8~图 11 观察比较了所述变焦曲线获取算法获取的图像与只使用自动对焦算法所获取的图像的质量差异。图 8 是物距为 5 m 时,使用本文所述跟踪曲线获取算法进行变焦跟踪得到的图像。图 9 也是物距为 5 m 时采集的图像,但未使用本文提出的算法进行变焦跟踪,只是进行了自

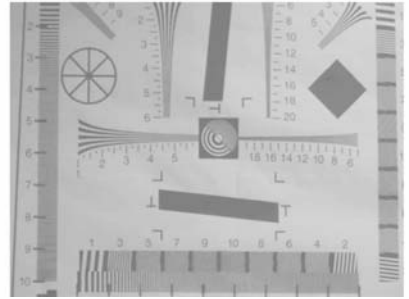


图 10 使用所述变焦跟踪曲线对焦图像(物距为 50 cm)

Fig. 10 Zoom tracking with obtained trace curves in object distance of 50 cm

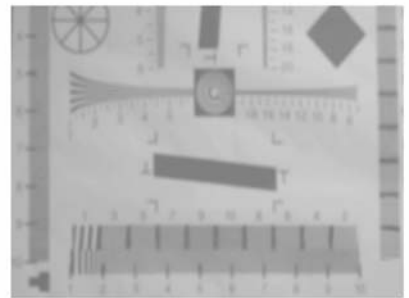


图 11 未使用所述变焦跟踪曲线对焦图像(物距为 50 cm)

Fig. 11 Zoom tracking without obtained trace curves in object distance of 50 cm

动对焦。图 10 和图 11 是在物距为 50 cm 时分别使用该算法和未使用该算法所获得的图像。从图中可以看出:在变焦过程中所述算法大大提高了采用自动对焦算法获取的图像的质量。

表 1 采集图像的清晰度值

Tab. 1 Definition values of images acquired

实验图像	图 8	图 9	图 10	图 11
<i>E</i>	62 783	48 156	33 652	12 843

其中 *E* 根据式(2)计算得到。表 1 从数量上说明了本文提出的变焦跟踪策略所获得的图像清晰度值高于在相同条件下没有使用该策略所获取的图像。

## 5 结 论

针对使用光学变焦镜头的成像系统,提出将变焦跟踪曲线应用于图像对焦中。通过计算图像

的清晰度值来获取跟踪曲线,从而保证跟踪曲线的真实可靠。结合几何法与自适应算法,只获取变焦跟踪曲线的上下两条边界曲线,能够计算出其它物距下的跟踪曲线,实现不同物距下的变焦跟踪。实验结果表明,使用所述算法的变焦成像系统图像清晰度比只用自动对焦算法提高了

30%以上。同时,采用梯度算子直接对 RAW 格式图像操作,计算图像的清晰度值,该方法既简单又准确,适用于原始图像格式输出的成像系统。为了使变焦跟踪曲线在图像对焦中发挥更大的作用,克服跟踪曲线非线性带来的误差将是今后一个重要的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 李国宁,刘妍妍,金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(03): 558-564.
- LI G N, LIU Y Y, JIN L X. Area CCD imaging system used in moving target tracking[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(03): 558-564. (in Chinese).
- [2] 崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2087-2091.
- CUI J CH. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2087-2091. (in Chinese)
- [3] PEDDIGARI V, KEHTARNAVAZ N, LEE SY, et al.. Real-time implementation of zoom tracking on TI DM processor[J]. *SPIE*, 2005, 5671: 8-18.
- [4] KIM Y, LEE J S, MORALES AW. A video camera system with enhanced zoom tracking and auto white balance[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2002, 48(3): 428-434.
- [5] 孙明磊,宗光华,毕树生. 基于照度优化的自动聚焦技术[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8):1508-1514.
- SUN M L, ZONG G H, BI SH SH. Automatic focusing technique based on illumination optimum[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1508-1514. (in Chinese)
- [6] SOHN S M, YANG S H, KIM S W, et al.. SoC design of an auto-focus driving image signal processor for mobile camera applications [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2006, 52(1): 10-16.
- [7] KEHTARNAVAZ N H. Development and real-time implementation of a rule-based auto-focus algorithm [J]. *Real-Time Imaging*, 2003, 9(3):197-203.
- [8] LEE J S, JUNG Y Y, KIM B S, et al.. An advanced video camera system with robust AF, AE, and AWB control[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2001, 47(3): 694-699.
- [9] LEE J H, KIMBDN K S. Implementation of a passive automatic focusing algorithm for digital still camera[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1995, 41(3): 449-454.
- [10] CHEN C M, HONG C M, CHUANG H C. Efficient auto-focus algorithm utilizing discrete difference equation prediction model for digital still cameras[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2006, 52(4):1135-1143.
- [11] 王任华,沈忙作. 自动对焦算法研究[J]. 光电工程, 2000, 27(4):11-13.
- WANG R H, SHEN M Z. Research on auto-focus algorithm[J]. *Photo-electric Engineer*, 2000, 27(4):11-13. (in Chinese).
- [12] 王倩,宋恩民,许向阳,等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J]. 光学精密工程, 2008, 16(01):166-171.
- WANG Q, SONG E M, XU X Y, et al.. Auto-focusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(01): 166-171. (in Chinese).
- [13] 李奇,冯华君. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报, 2002, 31(6):736-738.
- LI Q, FENG H J. Research on digital image definition evaluate function[J]. *Optic Letter*, 2002, 31(6):736-738. (in Chinese)
- [14] WEERASINGHE C, NILSSON M, LICHMAN S, et al.. Digital zoom camera with image sharpening and suppression[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(3):777-786.
- [15] 李奇,冯华君,徐之海. 自动对焦系统中图像非均匀采样的实验研究[J]. 光子学报, 2003, 32(12): 1499-1501.
- LI Q, FENG H J, XU ZH H. Experiment research on unsymmetrical sampling on the auto-focus system[J]. *Optic Letter*, 2003, 32(12): 1499-

1501. (in Chinese)

- [16] HE J, ZHOU R, HONG Z. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*,

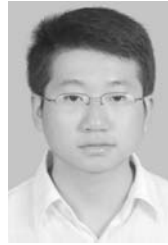
2003, 49(5):257-262.

- [17] CHEN C M, LEE H M. An efficient gradient forecasting search method utilizing the discrete difference equation prediction model[J]. *Applied Intelligence*, 2002, 16(1): 43-58.

#### 作者简介:



罗 钧(1963—),男,重庆人,教授,重庆大学光电信息工程系主任,1990年于重庆大学光电工程学院获得硕士学位,主要从事数码影像科技、嵌入式系统、精密仪器及机械、测试计量技术与仪器的研究。E-mail: luojun@cqu.edu.cn



闵志盛(1987—),男,江苏盐城人,硕士研究生,2009年于重庆大学获得学士学位,主要研究方向为嵌入式系统与数字图像处理。E-mail: simayizhi@163.com



孙 力(1984—),男,四川巴中人,硕士,2007年、2010年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要从事变焦成像系统的研究。E-mail: sxbzsl@yahoo.com.cn

#### ●下期预告

## 圆锥量规锥度的高精度光学干涉法测量

康岩辉,张 恒

(中国计量科学研究院,北京 100013)

为满足国家机械行业,特别是目前先进制造业中超精密数控机床对圆锥量规锥度的高精度测量需求,研究了一种将“大数”和“小数”相结合,准确进行圆锥量规锥度测量的方法。介绍了锥度测量系统的基本原理及组成结构,给出了实验测量结果,并分析了测量系统的不确定度。该测量方法利用最大分度间隔误差为 $0.10''$ 的多齿分度台构成高准确度分度系统以保证角度测量“大数”部分的准确性,采用激光偏振干涉装置及精密回转工作台组成小角度测量系统保证测量“小数”部分的精度,而双光束白光干涉系统实现测量位置的精确定位。实验和分析结果表明,该方法能够达到的锥度测量不确定度优于 $0.3''(k=2)$ ,可实现圆锥量规任意锥度的高精度测量。