

doi: 10.3788/gzxb20164510.1022002

基于图像自准直自动调焦技术

肖作江¹, 朱海滨², 徐志刚²

(1 长春理工大学, 长春 130022)

(2 吉林东光精密机械厂, 长春 130022)

摘 要: 根据航空相机调焦准确度要求及 CCD 相机成像特点, 提出了一种基于图像处理技术的航空相机自动调焦系统. 该系统基于自制分辨率靶标, 图像清晰度函数及优化的爬山算法, 利用自准直离焦补偿法实现由温度、大气压力引起航空相机离焦量的校正; 通过引入飞机高度数据进行离焦量计算, 并通过自准直调焦技术实现离焦校正. 对本系统进行了自动调焦测试实验, 结果表明, 该系统对相机的离焦校正误差小于相机的 1/2 焦深, 能够满足航空相机快速、高精度调焦要求.

关键词: 分辨率靶标; 爬山算法; 自动调焦; 离焦校正; 仿真实验

中图分类号: O432; O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1022002-5

Based on Image Autocollimation Automatic Focus Technology

XIAO Zuo-jiang¹, ZHU Hai-bin², XU Zhi-gang²

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 JiLin Dongguang Precision Machinery Factory, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the requirements of focusing accuracy and the imaging characteristics of the CCD camera, an automatic focusing system of aerial camera which is based on image processing technology was proposed. It was based on the self-made resolution target, the image sharpness function and the optimized mountain climbing algorithm. The calibration of the aerial camera's defocusing amount caused by temperature and atmospheric pressure were realized by using the self collimation and the defocusing compensation method. Through the introduction of aircraft altitude data to calculate the defocusing amount and the correction were achieved by using the self collimation focusing technology. The automatic focusing test experiment was carried out and the results show that, the system can satisfy the requirements of fast and high precision focusing of the aerial camera, the calibration error is less than 1/2 depth of the camera.

Key words: The resolution target; Hill-climbing algorithm; Automatic focus; Focus error correction ; The simulation results

OCIS Codes: 220.0220; 110.2945; 120.1680; 150.2945

0 引言

成像质量是航空相机最重要的性能指标之一. 航空相机在空中进行拍照时, 由于温度、大气压力和照相距离等因素变化, 会造成相机成像面位置发生变化, 产生离焦现象, 从而使得成像面上影像模糊, 分辨率降低, 因此, 不考虑大气压力和温度影响的自动调焦技术无法获得满意的图像质量^[1]. 目前航空相机上通常用

两种检焦方法: 一种是基于图像处理调焦方式, 该方式在拍摄对比度变化很大或对比度很低的景物时, 调焦较困难, 易调焦失败^[2]; 另一种是光电自准直调焦方式, 该方式是当前航空相机最常用的调焦方式之一, 该方法虽准确度高、通用性强, 但需要在焦面附近不同位置进行光强精确检测, 使得整个系统较复杂, 且检焦周期较长^[3]. 本文提出一种基于图像处理的自准直调焦方法, 该方法利用成像电荷耦合元件 (Charge-Coupled

基金项目: 国家重点研究发展计划 (No. 432156789) 资助

第一作者: 肖作江 (1973-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光电检测. Email: xiao2706@163.com

通信作者: 朱海滨 (1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为图像处理. Email: zhuhaibin324@163.com

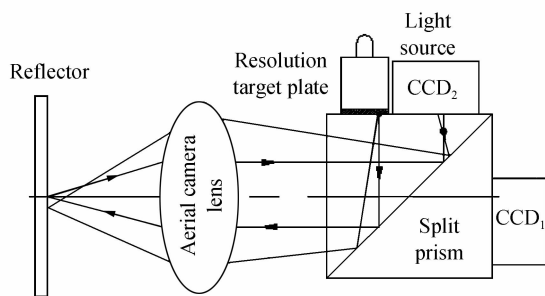
收稿日期: 2016-04-14; 录用日期: 2016-06-30

<http://www.photon.ac.cn>

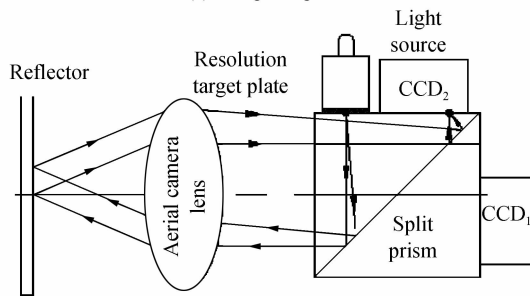
Device, CCD)像元大小制定分辨率靶标,分辨率靶标通过自准直方式成像到 CCD 成像面上,根据分辨率靶标图像清晰度函数,再结合优化的爬山算法,可在任何环境下在 CCD 成像面上检定焦面位置。

1 光电自准直原理

自准直调焦原理如图 1。该系统由反射镜(垂直于光轴)、航空相机镜头、分辨率靶标、光源、分光镜、 CCD_1 和 CCD_2 组成。分辨率靶标经过光源照亮,光线通过镜头后,被反射镜反射回来,再次经过镜头成像在 CCD_1 面上;分辨率靶标和 CCD_2 成像面必须严格共面。根据光学自准直原理,若分辨率靶标、 CCD_1 及 CCD_2 的成像面位于焦面上,那分辨率靶标发出的光线经镜头、反射镜及镜头后,像清晰地成像在 CCD_1 的成像面上,若分辨率靶标、 CCD_1 及 CCD_2 的成像面偏离焦面,那分辨率靶标发出的光线经镜头、反射镜及镜头后,像不能清晰地成像在 CCD_1 的成像面上。因此,只要能够找出最清晰的分辨率靶标像的位置,那么 CCD 面所在位置即为镜头焦平面位置。本系统通过图像处理方法,利用图像清晰度评价函数,结合系统硬件,判断找出图像最清晰的位置,得到最佳成像位置,实现自动调焦。



(a) The principle 1



(b) The principle 2

图 1 自准直调焦原理图

Fig. 1 The principle picture of autocollimating focusing

2 自准直调焦分辨率靶标设计

本系统 $f = 350 \text{ mm}$, $F = 5.6$, CCD 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 空间分辨率不低于 42 lp/mm , CCD 的奈奎斯特频率为 91 lp/mm , 分辨率靶标的空间频率不能超过 91 lp/mm , 否则 CCD 分辨不开。根据

JB/T9328-19999, 确定分辨率靶标最小线宽为 $5.61 \mu\text{m}$, 最大线宽为 $11.2 \mu\text{m}$; 按照 $1/\sqrt{2}$ 等比分成 7 个不同的线宽单元, 分辨率靶标设计为由 25 单元组成, 每一个单元内由相邻 45° 、长度相等 4 组明暗相间的平行线条组成, 线条间隔等于线条宽度, 如图 2。充分考虑镜头在相同视场中分辨率相同的特性, 将 7 个不同线宽的单元按照图 3 分配到 25 个单元中, 相同的线宽单元到中心单元距离相等, 中心单元为最小线宽单元。中心距离越大, 线宽越宽。

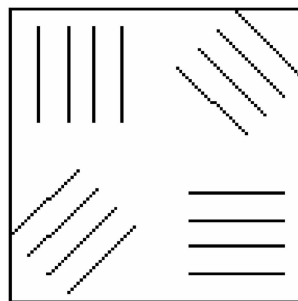


图 2 分辨率靶标单元

Fig. 2 The resolution of the target unit design

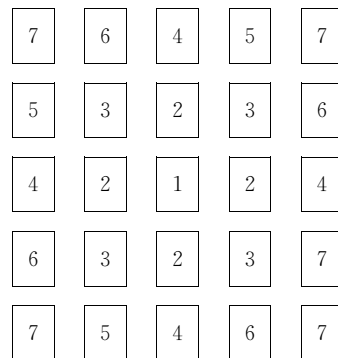


图 3 各单元排列位置

Fig. 3 The units arranged locations

3 自动调焦函数选取

采用图像处理法实现自动调焦的一个关键环节就在于图像清晰度评价函数的选取。国内外许多学者已经在这方面做了大量工作^[4-6], 现有评价函数包括: 高频分量法、方差法、最大熵法、边缘梯度法等。每种函数都有不同的特点, 且适用于不同的场合。如高频分量法灵敏度较高, 但调焦范围较小; 边缘梯度法调焦范围较宽, 但灵敏度较差, 容易造成较大的调焦误差; 方差法干扰噪声太强; 而最大熵法则没有规律性^[7]。为了兼顾准确度和响应速度, 因此本文设计了一种高频分量法和边缘梯度法相结合的粗、精调焦方法。先用边缘梯度的调焦函数以较大步距快速搜索到焦面附近, 再用波峰较窄的高频分量以小步距慢速搜索到焦面。粗调焦函数以大步距快速搜索, 精调焦函数在焦面附近, 灵敏度很高, 抗干扰性很强。因此, 这种法具有效率高、抗干扰性强、精确的特点。

粗调焦选用基于 Krisch 边缘检测算子的梯度法,评价函数为^[8-9]

$$\begin{cases} I = \sum_{i<M} \sum_{j<N} [K(i,j)] & i = 0,1,\dots,7 \\ K(i,j) = \max\{1, \max[Q_1 S_i - Q_2 T_i]\} \\ S_i = f(A_i + A_{i+1} + A_{i+2}) \\ T_i = f(A_{i+3} + A_{i+4} + A_{i+5} + A_{i+6} + A_{i+7}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K(i, j)$ 是以 (i, j) 为中心对 8 个邻域的像素点灰度位加权计算;取 3 个相邻点的加权和,与另 5 个相邻点的加权和,二者之差的最大位作为中心象素点的梯度值; A_k 表示 (i, j) 点周围 8 个邻域点中的一个, K 大于 7 时,取它除以 8 之后的余数。 Q_1, Q_2 为两个经验的权值。

精调焦采用高频分量法^[10-12],评价函数为

$$I = \frac{\left| \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} J(x,y) \exp[-i\pi(x+y)] \right|}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [J(x,y)]} \quad (2)$$

式中, N, M 表示像元的数目, $J(x, y)$ 表小像元的灰度值。

4 自动调焦搜索方式选取

在理想情况下,用普通爬山式搜索方式能够达到很好的效果(与人的思维近似)^[13-14]。但在系统调试过程中发现,当焦面从偏离聚焦点的位置向聚焦点运动时,由于受到噪声的存在、调焦机构的快速运动、光源的不稳定以及震动等因素的影响,导致调焦过程的准确度变差,甚至不能完全聚焦,使自动调焦失败。

本文采用阈值与四点判断调焦方向的一种抗干扰方法。即在调焦过程中对调焦函数值进行比较时,首先设定一个阈值 T ,使调焦值的改变量 $\Delta = f_{n+1} - f_n$ 当 $(\Delta > T)$,认为变化明显,继续向前搜索; $\Delta < -T$,认为变化明显,找到了单调性的改变; $|\Delta| < T$,认为变化不明显,仍然继续向前搜索。

设定一个阈值后,如果干扰波动处于宽度为 T 的带状区域内,根据上面的搜索规则,仍继续向前搜索,使其忽略了局部峰值,而保持了一致的前进方向。在确认曲线方向时,不是仅根据前后两次调焦结果来确定,而是需要四个点确定曲线方向。如果四点连续上升,则确定曲线为上升方向;如果四点连续下降,则确定曲线为下降方向。通过这样的改进,就能够有效排除局部极值和干扰带来的误判断,使系统能准确可靠地实现调焦。

5 自动调焦测试

自动调焦分为两部分:一部分为了消除大气压力、温度的变化引起的相机成像面的变化;另一部分是为消除高度的变化引起相机成像面的变化;第一部分主

要是由调焦算法及搜索方式决定,第二部分主要是由调焦执行机构的移动准确度决定,要想获得相机最佳的成像面,有必要对这两部分进行测试。

5.1 调焦算法及搜索方式测试

相机镜头的焦深公式为^[15]

$$\delta = 4F^2 \lambda \quad (3)$$

式中: F 为相机的 F 数; λ 为可见光中心波长。

由上式可得出相机的焦深约为 0.04 mm,调焦最小步长应小于 1/4 焦深,粗调步距为 10 个最小步距;精调步距为 1 个最小步距,最小步距 0.01 mm。系统在 ± 1 mm 范围内进行自动调焦,共采集 40 副不同位置的图片,时间大约 20s,图 4 为第 10 副、第 15 副、第 20 副图片。粗调焦选用基于 Krisch 边缘检测算子的梯度法,精调焦选用高频分量法所得归一化曲线如图 5,其中横轴坐标为各幅图像的序号,从归一化曲线及图片的清晰度可以判定调焦原理是可行的。

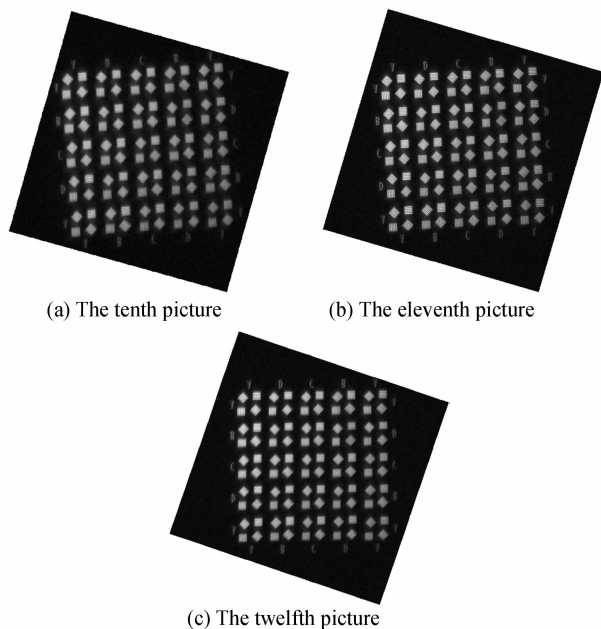


图 4 具有复杂细节的图像

Fig. 4 With complex details of image

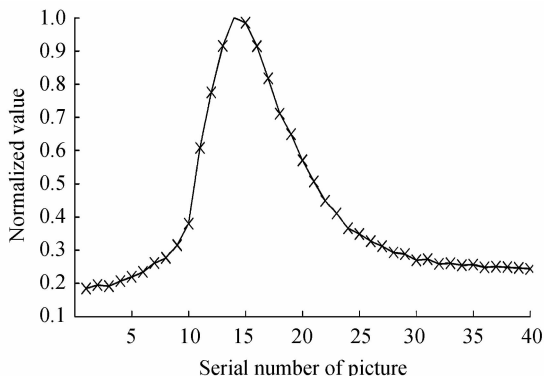


图 5 归一化曲线

Fig. 5 The normalized curve

5.2 调焦执行机构的准确度测试

调焦执行机构的准确度包括位置移动准确度和晃动准确度两部分,由于相机的调焦是内调焦,即移动相机物镜中的一组镜片,直接测试相机调焦执行机构的准确度非常困难,所以本文采用移动平行光管分划板来模拟相机所拍摄景物的高度,用相机直接对平行光管分划板像进行拍照,然后对像质进行评价间接对调焦准确度进行测试。

1) 测试原理

模拟摄影高度原理如图 6。

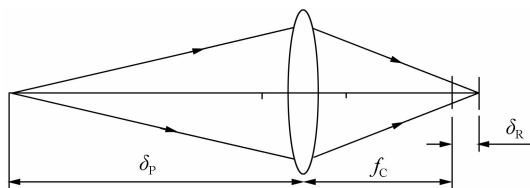


图 6 模拟摄影高度

Fig. 6 The picture of analogy photography height

根据牛顿公式

$$\delta_R = f_c^2 / \delta_p \quad (4)$$

通过移动分辨率板距离可以模拟不同摄影高度。

调焦执行机构的准确度测试原理图如图 7, \$\delta_C\$ 与

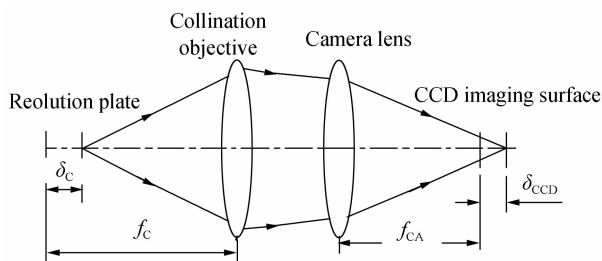


图 7 测量原理

Fig. 7 Measuring principle

\$\delta_{CCD}\$ 的关系为

$$\delta_{CCD} = \frac{f_{CA}^2}{f_c^2} \delta_R \quad (5)$$

对式(5)两边微分得

$$\Delta \delta_{CCD} = \frac{f_{CA}^2}{f_c^2} \Delta \delta_R \quad (6)$$

调整相机的光轴与准直物镜的光轴重合,按照模

拟摄影景物高度移动准直物镜的分划板,相机按照摄影高度进行自动调焦,调焦完成后,对准直物镜的分辨率板进行拍照,读出并记录准直物镜分辨率板的位置 \$\delta_{R1}'\$,前后移动准直物镜分辨率板,找出相机成像分辨率最高的位置,读出并记录准直物镜分辨率板的位置 \$\delta_{R2}'\$,通过分辨率板两位置的差值 \$\Delta \delta_R'\$,根据式(6)计算出对应某一摄影高度的调焦误差 \$\Delta \delta_{CCD}'\$。

一般准物镜的焦距是相机的 3~5 倍。故采用焦距为 2 000 mm 的平行光管进行测试,相机摄影高度范围 500~12 000 m,当摄影高度为 9 000 m 时,相机 CCD 成像面距离无穷远焦面相差 0.01 mm(约为四分之一焦深),可以不用高度补偿,高度变化 \$\pm 500\$ m 时,CCD 成像面变化在二分之一焦深内,只需对 \$\infty\$、1 km、2 km、3 km、4 km、5 km、6 km、7 km、8 km 进行测试,每个测试 10 组数据,取其均值,得到的实验数据如表 1。

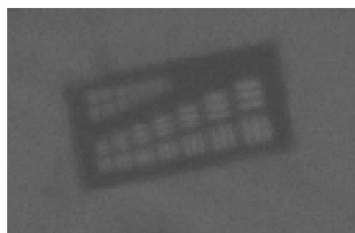
表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

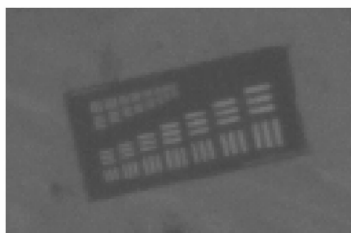
Photography height/km	\$\delta_{R1}'\$/mm	\$\delta_{R2}'\$/mm	\$\Delta \delta_R'/mm\$	\$\Delta \delta_{CCD}'/mm\$	Resolving power/(lp \$\cdot\$ mm\$^{-1}\$)
\$\infty\$	32.12	31.92	0.177 778	0.004	89
8	32.62	32.93	0.311 111	0.007	89
7	32.69	33.05	0.355 555	0.008	89
6	32.79	32.52	0.266 666	0.006	89
5	32.92	33.36	0.444 444	0.010	89
4	33.12	33.7	0.577 777	0.013	89
3	33.46	32.97	0.488 888	0.011	89
2	34.12	34.72	0.622 222	0.014	89
1	36.12	36.83	0.711 110	0.016	89

从表 1 可看出,所测得的调焦最大误差为 0.016 mm,小于 0.02 mm(相机二分之一焦深),引起该误差的原因主要有两点,一是精调步距最小为 0.01 mm,因此很容易产生一个步距左右的误差;另一个原因就是由于调焦电机的转动准确度所致。

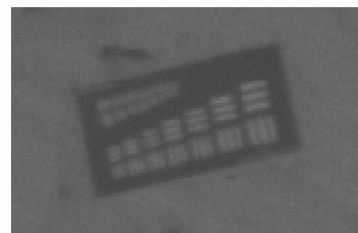
为验证此系统是否满足相机实际调焦的准确度要求,进行试飞试验,图 8 为采用本系统的相机在高度为 6 000 m 高空,不同调焦位置处获得地面分辨率靶标图



(a) The image of two minimum steps before the auto focus position



(b) The image at the auto focus position



(c) The image of two minimum steps after the auto focus position

图 8 不同调焦位置处两个最小步距图像

Fig. 8 The images of two minimum steps at different focus position

像。由图8可以看出采用此系统进行自动调焦获取图像比前后移动两个最小步距(相机二分之一焦深)图像清晰,故本系统调焦误差小于0.02 mm,满足相机自动调焦的准确度要求。

6 结论

航空相机的自动调焦技术是保证成像质量的关键技术之一。本系统采用自制分辨率靶标、自准直原理及图像处理方法进行调焦,克服了直接对地景物成像时,由于地物目标对比度不够明显时调焦困难的缺点,提高了系统的适应性。与非图像处理的自准直调焦方法比较,该系统利用相机自身CCD,减少相机系统额外组件(能量接收器),提高系统的可靠性,采用高频分量法和边缘梯度法相结合的粗、精调焦方法,提高系统的调焦速度及准确度。通过实验室测试、试飞试验证明,该系统重复定位准确度达到0.02 mm,调焦时间小于20 s,满足航空相机调焦要求。解决了大气压力、温度和摄影高度变化时引起成像面移动从而使成像质量变差的问题,保证相机的成像质量。由于光源均匀性、稳定性及反射镜转动到调焦位置处静止性不够理想,导致系统成像质量一致性不是很高,有待进一步改进。

参考文献

- [1] 耿立中,安文化,车念曾. KA-112A全景式航空照相机[M]. 北京:中国人民解放军空军司令部情报部,1988:178-198.
- [2] MA Heng-kuo, WEI Guo-qiang. Based on image processing the study of stability of automatic focusing method[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, **43**(2): 33-36.
麻恒阔,魏国强. 基于图像处理自动调焦方法的稳定性研究[J]. *航空精密制造技术*, 2007, **43**(2): 33-36.
- [3] ZHU He, LIANG Wei, GAO Xiao-dong. Aviation camera optoelectronic autocollimation focusing system [J]. *Photoelectric Engineering*, 2011, **38**(3): 35-39.
朱鹤,梁伟,高晓东. 航空相机光电自准直检调焦系统[J]. *光电工程*, 2011, **38**(3): 35-39.
- [4] SHI Lei, JIN Guang, TIAN Hai-ying, et al. Aviation camera automatically examines autocollimation method research[J]. *Optical Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2460-2464.
史磊,金光,田海英,等. 航空相机的自准直自动检焦方法研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2460-2464.
- [5] WANG Yong, TAN Yi-hua, TIAN Jin-wen. A new image sharpness evaluation function [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, **29**(3): 124-126.
王勇,谭毅华,田金文. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, **29**(3): 124-126.
- [6] CAI Ming-rong, MA Jun-shan, WANG Fu-hong. Automatic focusing system in the research of image resolution discriminant method[J]. *Optical Instrument*, 2008, **30**(5): 35-39.
- 蔡明荣,马军山,王福红. 自动调焦系统中图像清晰度判别方法的研究[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(5): 35-39.
- [7] MU Hong-xin, WU Qing-chang, ZHANG Cui, et al. An improved mountain climb searching algorithm in auto-focusing [J]. *Journal of Kunming Metallurgy College*, 2010, **26**(3): 32-35.
牟宏鑫,吴庆畅,张翠,等. 一种改进的自动调焦爬山搜索算法[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2010, **26**(3): 32-35.
- [8] LIU Chun-tong, ZHANG Yang, HE Zhen-xin, et al. Optimization design of automatic focusing and climbing mountain searching algorithm in electronic theodolite system [J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, **22**(4): 1178-1181.
刘春桐,张洋,何祯鑫,等. 电子经纬仪系统中自动调焦爬山搜索算法的优化设计[J]. *计算机测量与控制*, 2014, **22**(4): 1178-1181.
- [9] HE Zhen-xin, LIU Chun-tong, HUANG Xian-xiang, et al. Auto focus search algorithm based on MTF assisted positive focus judgment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0411002.
何祯鑫,刘春桐,黄先祥,等. 基于MTF辅助正焦判断的自动调焦搜索算法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0411002.
- [10] WEI Yu-ke, LI Jiang-ping, DUAN Yang-guang, et al. An automatic focusing algorithm for tongue image acquisition based on image processing [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2011, **41**(4): 95-100.
韦玉科,李江平,段仰广,等. 一种基于图像处理的舌象采集自动调焦算法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2011, **41**(4): 95-100.
- [11] ZHOU Jiu-fei, ZHAI Lin-pei, ZHOU Gang, et al. Automatic method of aerial imaging device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 105-108.
周九飞,翟林培,周刚,等. 航空成像设备自动调焦方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 105-108.
- [12] YUAN Yu-kai. Automatic focusing method for optical system [J]. *Infrared*, 2004, (6): 15-21.
原育凯. 光学系统的自动调焦方法[J]. *红外*, 2004, (6): 15-21.
- [13] XU Zhao-lin, ZHAO Yu-liang, ZHANG Guo-dong. New type of automatic aerial camera focusing system design [J]. *Lighting and Control*, 2011, **18**(4): 77-80.
许兆林,赵育良,张国栋. 新型航空相机自动调焦系统的设计[J]. *电光与控制*, 2011, **18**(4): 77-80.
- [14] GONG Guang-yong, HE Wen-zhong, GAO Cu-hui. Infrared automatic focus mountain climbing searching algorithm in the system optimization design [J]. *Laser and Infrared*, 2007, **37**(11): 1213-1215.
宫光勇,何文忠,高旭辉. 红外系统中自动调焦爬山搜索算法的优化设计[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(11): 1213-1215.
- [15] YANG Quan, LIU Jing-hong, MA Xiao-fei. Auto-focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, **26**(5): 677-682.
杨权,刘晶红,马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法[J]. *液晶与显示*, 2011, **26**(5): 677-682.