

文章编号 1004-924X(2007)06-0966-07

视线跟踪系统中 CCD 摄像机的自适应调节

刘瑞安^{1,2}, 靳世久¹, 吴晓荣², 张希坤²

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 天津师范大学 物理与电子信息学院, 天津 300074)

摘要:分析了视线跟踪系统中光源、摄像机、眼睛角膜及光斑的几何位置关系,提出了眼睛跟踪策略和一种调光、变焦、聚焦相结合的 CCD 物镜自动调节方法。对捕获图像进行处理,依据图像灰度均值控制光圈,以适应外部环境光强变化;利用 SMD 算子大步幅快速粗聚焦,提取图像中光斑信息控制云台瞄准、跟踪眼睛,并进行变焦控制,可在用户头肩图像中自动定位眼睛,适应用户头部位置变化;在眼睛区域自动确定检测窗,在检测窗内使用 FSWM 聚焦算子判断图像清晰度,实现自动聚焦。若图像中能提取瞳孔信息,则依据瞳孔边缘梯度均值实时调整聚焦。实验表明,在不同外部环境光强及用户在不同使用位置情况下,CCD 摄像机通过自适应调节,可实时跟踪眼睛并捕获到清晰眼睛图像。

关键词:视线跟踪系统;CCD 摄像机;自适应调节;自动聚焦;眼睛跟踪

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A

Adaptive regulation of CCD camera in eye gaze tracking system

LIU Rui-an^{1,2}, JIN Shi-jiu¹, WU Xiao-rong², ZHANG Xi-kun²

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *College of Physics and Electronic Information Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300074, China*)

Abstract: An eye-gaze tracking method and an automatic adjusting method for object lens of CCD camera in combining the aperture regulation with zooming and focusing are proposed by analyzing the geometrical positions of two LEDs, a camera, an eye cornea and its glints. The aperture of CCD lens is controlled to adapt the system to external lighting circumstances based on the average brightness values of the processed images. A SMD operator is used for focusing roughly and quickly in a large scale for obtaining the eye glints to control a pan-tilt unit for eye aiming and eye tracking, and regulating the focus of the lens to locate the eye and adapt the head movements in a head-shoulder image. The FSWM operator is applied in the determined window in the eye region to focus automatically for getting clear images. If the pupil can be extracted from the image, the average gradient of the edge points of the pupil can be used for real-time focusing. Experiments show that this system can track the eye and acquire clear eye images in real time by the adaptive regulation of the CCD camera in different external lightings and user position conditions.

Key words: eye-gaze tracking system; CCD camera; adaptive regulation; automatic focusing; eye tracking

收稿日期:2006-10-14;修订日期:2007-01-07.

基金项目:天津市高等学校科技发展基金资助项目(No. 20051017)

1 引言

在基于角膜反射原理的视线跟踪系统中, CCD 捕获的眼睛图像传输到计算机,经图像处理提取瞳孔中心与光斑位置信息,进而估算出眼睛视线方向。系统对捕获的眼睛图像质量要求很高,图像的清晰与否,直接影响到测量精度的高低。为了减少对用户的头部限制,系统应允许用户头部在一定范围内自由活动,但为了提高系统的分辨率和准确度,CCD 捕获的又是很小视场内的眼睛图像,这样头部运动,眼睛就会跑出视场;且头部前后移动,捕获图像中眼睛的大小、光强及图像清晰度均将变化,影响后续算法的稳定性。这就对光学成像系统提出了较高要求:CCD 摄像机不仅应当能够实时跟踪头部运动,瞄准眼睛;而且 CCD 物镜还应当能够进行变焦调节,以适应头部在景深方向的运动;同时能够进行光圈调整,以适应外部环境光强变化;最后能够自动聚焦,以获取清晰眼睛图像。因而,CCD 摄像机的自动调节是系统的关键环节。

传统的手动调节依靠人的目测和手调,不仅繁琐、耗时长,调整精度受人员主观影响较大,而且难于实现自动化。自动调焦技术从 20 世纪 70 年代后期发展起来,从基本原理来说,自动调焦可以分成两大类:一类是基于镜头与被摄目标之间距离测量的测距方法,根据物方情况调整光学系统;另一类是基于调焦屏上成像清晰的聚焦检测方法,根据成像情况调整光学系统。常见的调焦方法根据其判别准则来源于物方还是像方,可分为主动法和被动法。主动法是指各种方式的物距检测;被动法则是像质评价。测距方法的自动调焦主要有三角测量法、红外线测距法和超声波测距法,该方式需要额外的测距设备,适用范围相对较小。被动法中的以数字图像处理作为调焦检测函数的方法,具有算法灵活多变、控制容易实现等优点。采用图像处理法实现自动调焦的一个关键问题就在于图像清晰度评价函数的选取。衡量判据性能的标准是它对焦距变化的敏感程度以及它的计算复杂度,调焦判据的选取和调焦流程的设计很大程度上决定了自动聚焦的灵敏度、速度和可靠性。

近年来 CCD 图像采集和图像处理技术逐步

成熟,国内外学者提出了多种调焦判据,基于图像分析的自动调焦方法已经得到应用^[1-18]。但大部分系统多是对静止目标在焦平面附近小范围内实现自动聚焦,难于自动调整焦距对运动目标实时跟踪并瞄准定位,无法自动调节光圈以适应环境光强变化,且很多自动聚焦算法实时性不强,难于应用到实时系统中。因此,寻求一种可用于视线跟踪系统的自动调焦技术仍是一项挑战性的工作。本文针对视线跟踪系统中眼睛图像特点,提出了一种眼睛跟踪策略和一种光圈、变焦、聚焦相结合的 CCD 物镜自动调节方法,能够实时地捕获到清晰的眼睛图像,满足了系统的要求。

2 几何分析

视线跟踪系统采用两个 LED 近红外光源,置于屏幕两侧。用户头部在一限定区域(正常工作区域),眼睛盯视屏幕,经角膜反射形成两个光斑。眼睛角膜采用球模型处理,角膜、摄像机及光斑几何位置关系如图 1 所示。

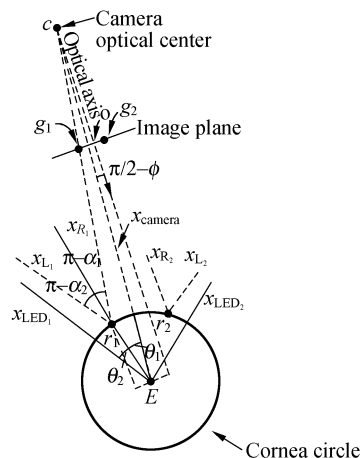


图 1 眼睛角膜、摄像机及光斑几何位置关系

Fig. 1 Geometrical positions of cornea, camera and glints

角膜半径为 r , 中心为 E 。光源 LED_1 、 LED_2 在角膜上形成光斑 r_1 、 r_2 , 图像中对应为光斑 g_1 、 g_2 。摄像机焦距为 f , 光心为 C , 光轴、像平面如图所示, 光轴和像平面交点为 O 。 E 、 C 间距离为 x_{camera} , E 和 LED_1 、 LED_2 距离为 x_{LED_1} 、 x_{LED_2} 。 r_1 和 LED_1 间距离为 x_{L_1} , r_1 、 C 间距离为 x_{R_1} ; r_2 和 LED_2 间距离为 x_{L_2} , r_2 、 C 间距离为 x_{R_2} 。线 CE 和光轴夹角为 $\pi/2 - \phi$, 线 EC 和 E 、 LED_1 连线夹

角为: $\theta_1 + \theta_2$, 和 E 、 LED_2 连线夹角设为: $\theta_3 + \theta_4$ (图中略)。 g_1 和 O 间距离为 d_1 , g_2 和 O 间距离为 d_2 。由图得:

$$d_1 = \frac{f x_{\text{camera}} \cos \phi - r f \cos(\theta_1 + \phi)}{x_{\text{camera}} \sin \phi - r \sin(\theta_1 + \phi)}, \quad (1)$$

$$\frac{x_{R_1}}{\sin \theta_1} = \frac{x_{\text{camera}}}{\sin \alpha_1}, \quad \frac{x_{L_1}}{\sin \theta_2} = \frac{x_{LED_1}}{\sin \alpha_2}, \quad (2)$$

据反射定理, $\alpha_1 = \alpha_2$,

$$\text{则 } \sin \theta_2 = \frac{x_{\text{camera}} x_{L_1}}{x_{LED_1} x_{R_1}} \sin \theta_1, \quad (3)$$

又 x_{camera} 、 x_{L_1} 、 x_{LED_1} 、 x_{R_1} 较 r 大很多,

$$\text{故 } \sin \theta_2 \approx \sin \theta_1, \quad (4)$$

因摄像机捕捉眼睛图像时视角很小, 故 $\phi \approx \pi/2$ 。

$$\text{则 } d_1 \approx \frac{r f \sin \theta_1}{x_{\text{camera}} - r \cos \theta_1} \approx \frac{r f \sin \theta_1}{x_{\text{camera}}}, \quad (5)$$

$$\text{同理, } d_2 \approx \frac{r f \sin \theta_3}{x_{\text{camera}} - r \cos \theta_3} \approx \frac{r f \sin \theta_3}{x_{\text{camera}}}, \quad (6)$$

$$\text{光斑间距离 } d \approx \frac{r f (\sin \theta_1 + \sin \theta_3)}{x_{\text{camera}}}, \quad (7)$$

光源固定时, 两个光斑间的距离与头部位置、CCD 物镜焦距有关, 可作为调整焦距的依据。增大焦距, 光斑间的距离也就增大。头部在景深方向移动时, 可通过调节焦距, 保持光斑间距离不变。

3 自适应调节策略与算法描述

系统中, 摄像机置于云台上, 能做二维扫描, 适应头部位置变化; CCD 物镜镜头是采用可变焦距的, 是依靠变焦组和补偿组这两个透镜组沿光轴方向的移动来改变焦距的大小, 从而改变物镜对目标的放大倍数和视场角, 达到连续调节观察范围的目的, 适应头部在景深方向的运动。

系统工作中, 计算机通过镜头和 CCD 采集到一系列的数字图像, 对每一帧图像进行实时处理。首先依据图像灰度信息调整光圈; 光圈确定后, 依据图像中光斑信息, 判断焦距是否合适, 驱动变焦电机使变焦物镜向长焦或短焦方向相应运动来调整焦距, 并控制云台瞄准、跟踪目标; 最后利用聚焦算子, 判断聚焦是否准确、成像是否清晰, 并给出反馈信号控制镜头的运动来实现自动聚焦, 获得清晰眼睛图像。算法确定了依次调整光圈、变焦、聚焦的顺序, 算法流程如图 2 所示。

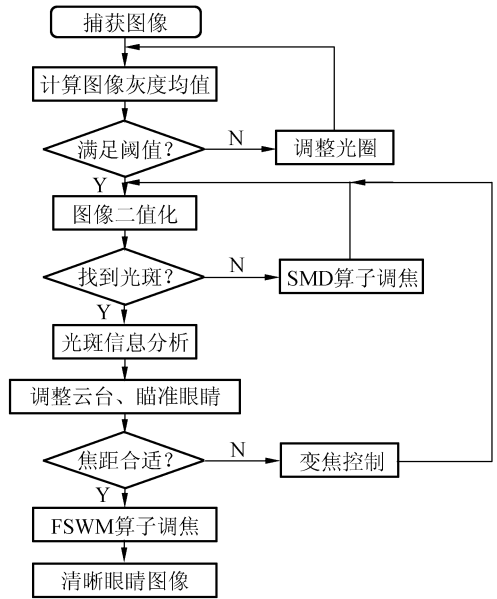


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the algorithm

3.1 光圈控制

图像亮度取决于光圈控制的 CCD 曝光量的大小。光圈过大则图像过亮, 光圈过小则图像过暗, 两种情况下均无法可靠地调整焦距及聚焦, 故应首先确定光圈大小。依据图像亮度, 判断 CCD 曝光量是否合适。系统中 CCD 拍摄图像为灰度图像。图 3 为同一场景随着逐步增大光圈所得的图像。



图 3 不同光圈下捕获的图像

Fig. 3 Images in different aperture levels

采集图像中每点的灰度值为 $I(x, y)$, 图像的灰度均值为:

$$V = \frac{\sum I(x, y)}{h \times w}, \quad (8)$$

式中 h 和 w 为图像高度和宽度。光圈大小用 F 来表示, 实验表明在光圈可调范围内, 函数 $F = f(V)$ 是单调变化的。在视线跟踪系统中, 由于使用近红外光源和带通滤光片, 且被测处于限定区域内, 理想眼睛图像的灰度均值应在一小范围之内, 因此可通过设定一个灰度阈值范围来实现光

圈控制。对采集的序列图像,计算当前帧的灰度均值,若均值小于灰度阈值范围,则返回增大光圈控制信号,增大曝光量;反之,则控制光圈减小曝光量。直到捕获图像灰度均值落在阈值范围之内时,停止光圈调节。如此,CCD 摄像机可依据捕获图像的灰度信息自动调节光圈,实现对光强变化的自适应调节。

3.2 变焦调节与眼睛跟踪

聚焦反映了图像的清晰度情况,聚焦不合适,图像模糊,无法提取有效信息。图 4 是眼睛的散

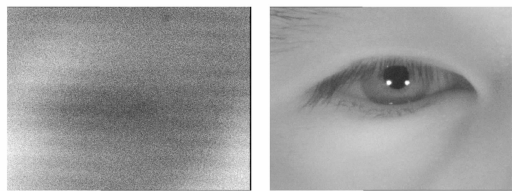


图 4 眼睛的散焦图像和聚焦图像

Fig. 4 Misfocused image and focused image of an eye

焦图像和聚焦图像。为确保能够在图像中提取光斑信息,先快速粗调聚焦。由于只需提取出光斑信息即可,无须对图像精确聚焦,采用计算速度较快的相邻像素灰度方差法 SMD。算子运算公式为:

$$\text{SMD} = \frac{1}{n} \left[\sum |I(x, y) - I(x, y-1)| + \sum |I(x, y) - I(x+1, y)| \right], \quad (9)$$

式中 $I(x, y)$ 对应于 (x, y) 位置的灰度值, n 为图像的像素总数。利用 HCS (Hill-Climbing Search) 算法大步幅快速粗调聚焦。对调焦后图像,由于光斑在图像中亮度最高,选取合适阈值得到二值化图,经处理可提取光斑信息。两个光斑的中心坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, 中心位置 C 的坐标为: $(\frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2})$, 光斑间距离为:

$$d = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{1/2}, \quad (10)$$

根据 C 的坐标控制云台,控制方向为使下一帧图像中 C 向图像中央运动,瞄准、跟踪定位眼睛。依据光斑间距离 d 的大小来控制变焦方向和幅度,尽快调节完毕。在视线跟踪系统中,可为 d 确定一标准值范围 D 。如果 $d < D$,眼睛在图像中所占比例较小,系统精度低,需增大焦距;如果 $d > D$,可能无法得到完整的眼睛图像,需减小焦距。在变焦过程中,为提高 CCD 物镜调节速度,

对各帧图像处理时,若能提取出光斑信息,则无须在当前位置聚焦,如果无法提取光斑信息,则在当前位置再次聚焦。

3.3 精确聚焦

通常,判断图像聚焦与否是通过调焦评价函数(即聚焦算子)来衡量的。目前,国内外学者提出了许多聚焦算子,其中比较常用的有 Tenengrad 算子、修正拉普拉斯总和 SML 算子、模数偏差总和 SMD 算子、亮度变化 VAR 算子等。各种算子性能不同,应用场合也不同。

一个理想的调焦算子应满足无偏性、单峰性、灵敏度高、信噪比好和计算量小等要求。然而在实际应用中,由于受到噪声等的影响,在利用聚焦算子分析所拍摄的图像进行自动聚焦过程中,聚焦算子值不仅具有一个全局最大值、还具有很多的局部极值点,其曲线不是一条单调上升或单调下降的光滑曲线。为消除图像中的脉冲噪声影响,对图像进行高斯平滑滤波,可有效地消除图像的尖锐噪声。为提高速度,依据光斑位置,确定检测窗,仅对检测窗图像进行操作。

目前大多数聚焦算子都是基于梯度、偏差来计算图像的高频分量,梯度、偏差算子实际上是一个高通滤波器。而中值滤波器既能有效地保留图像的边界,又能有效地抑制脉冲噪声。采用 FSWM 滤波算子能够较好地实现正确聚焦。

FSWM 滤波算子的计算公式:

$$\text{FSWM} = \sum_x \sum_y F_x^2 + \sum_x \sum_y F_y^2, \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} F_x &= \text{med}\{I(x-1, y), I(x, y), I(x+1, y)\} - \\ &\quad \frac{1}{2} \text{med}\{I(x-3, y-2), I(x-2, y-2), \\ &\quad I(x-1, y-2)\} - \frac{1}{2} \text{med}\{I(x+1, y+2), \\ &\quad I(x+2, y+2), I(x+3, y+2)\} \\ F_y &= \text{med}\{I(x, y-1), I(x, y), I(x, y+1)\} - \\ &\quad \frac{1}{2} \text{med}\{I(x-2, y-3), I(x-2, y-2), \\ &\quad I(x-2, y-1)\} - \frac{1}{2} \text{med}\{I(x+2, y+1), \\ &\quad I(x+2, y+2), I(x+2, y+3)\} \end{aligned}$$

式中, $I(x, y)$ 为窗口图像像素的灰度值, med 为取中值。利用 FSWM 滤波算子作判据,用登山算法实现自动精确聚焦。跟踪眼睛时,如果在图像

中能够提取出瞳孔边缘,则直接利用瞳孔边缘点梯度均值来实时调节聚焦,具体算法见作者文献[19]。

4 实验结果

系统硬件包括摄像系统、照明系统、图像采集卡、计算机、控制卡、伺服电机。摄像系统中 CCD 摄像机置于云台上,由伺服电机驱动。采用 LED 近红外光源照明,摄像机为对近红外敏感的低照度 CCD 摄像机(25 frame/s),有效像素(K):C440K。CCD 物镜采用变倍镜头,焦距(f):12~120 mm;光圈(F):1.8~22;前置带通滤光片,后配 2 倍光学放大器。实验环境为:操作系统为 Windows XP,CPU 为 Pentium 4 的 PC 机,算法用 Visual C++ 实现。实验系统的实物图见图 5,系统结构如图 6 所示。

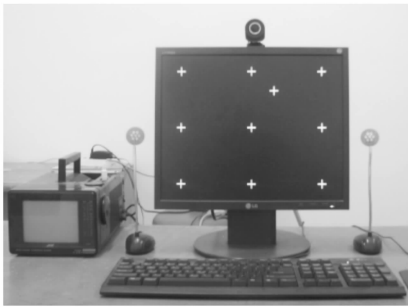


图 5 实验系统实物图

Fig. 5 Experimental system

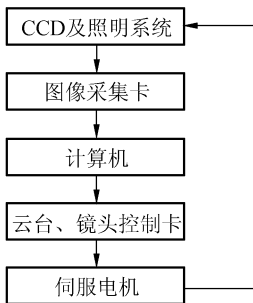


图 6 系统结构图

Fig. 6 System structure

在用户头部处于正常工作区域的情况下(面对屏幕,距离屏幕 40~80 cm),分别在左中右、前中后所组合九个位置及白天、晚上两种环境下进行实验 36 次。CCD 镜头初始为大视场,光圈值

不确定。实验表明,CCD 摄像机可通过自适应调节,在几秒内成功瞄准眼睛,捕获到清晰眼睛图像。表 1 为部分实验结果。在 36 次实验中,CCD 物镜自动定位到眼睛的平均时间为 4.35 s,晚上实验中 CCD 摄像机自适应调节平均时间较短,这是由于外部环境光线干扰较小,较容易提取光斑信息,从而在变焦过程中不用在多个位置聚焦的缘故。

表 1 实验结果

Tab. 1 Experimental results

序列	头部位置	环境	调节时间(s)
1	左前	白天	4.3
2	左前	晚上	3.2
3	左后	白天	4.7
4	右后	晚上	3.9
5	右后	白天	5.8

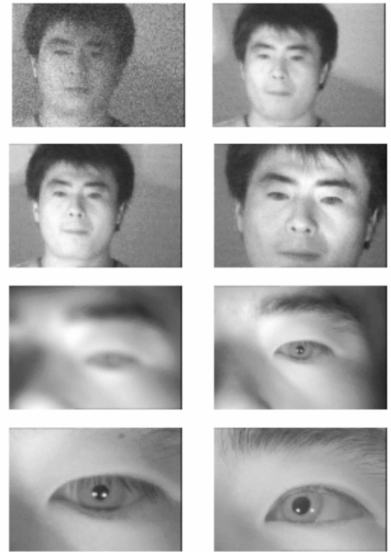


图 7 实验中捕获的部分图像

Fig. 7 Some captured images in an experiment

图 7 为一次实验中,CCD 自适应调节过程中捕获图像序列中的部分图像。

实验结果表明,提出的基于图像处理的 CCD 摄像机自动调节方法快速准确,对外部环境光强变化、用户头部位置变化具有自适应能力。而一旦在捕获的眼睛图像中能够提取出瞳孔边缘,则可以直接利用瞳孔边缘点梯度均值来实时调节聚焦,捕获到清晰眼睛图像序列(25 frame/s)。系统仍然存在的问题是当用户头部运动过快及眼睛眨眼时,会出现跟踪失败。目前的处理方法是跟

踪失败时,等待几帧,若仍然跟踪失败,则开大 CCD 视场,重新调节,这样效率不高,有待改进。

5 结 论

针对视线跟踪系统提出的 CCD 摄像机自动调节方法,对外部环境光强变化、用户头部位置变化具有自适应能力。避免了人工调焦的繁琐并提高了调节的准确性,能够满足视线跟踪系统的要

求,已成功应用于视线跟踪系统中。与目前大多数调焦系统相比较,本算法具有以下优点:第一,对运动目标能够跟踪、瞄准并自动调焦,可由大视场下的头肩图像,自动瞄准定位眼睛,捕获到清晰眼睛图像。第二,能够适应不同的光照条件。第三,可应用于实时系统中。未来工作拟通过引入头部运动预测算法,来克服头动过快时眼睛跟踪失败的不足。

参考文献:

- [1] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1063-1069. (in Chinese)
- [2] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, et al.. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 468-472. (in Chinese)
- [3] 马军山,侯琳琳,付东翔,等. 双荧光标记生物芯片激光共聚焦检测系统[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 727-734.
MA J SH, HOU L L, FU D X, et al.. Two-laser scanning confocal system for microarray analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 727-734. (in Chinese)
- [4] 朱铮涛,黎绍发,陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 537-542.
ZHU ZH T, LI SH F, CHEN H P. Research on auto-focused function based on the image entropy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 537-542. (in Chinese)
- [5] 赵辉,鲍歌堂,陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 531-536.
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 531-536. (in Chinese)
- [6] 李清军. 一种新型视频调焦方法的研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(3): 105-109.
LI Q J. Studying on a new method of video focusing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(3): 105-109. (in Chinese)
- [7] 康宗明,张利,谢攀. 一种基于能量和熵的自动聚焦算法[J]. 电子学报, 2003, 31(4): 552-555.
KANG Z M, ZHANG L, XIE P. Implementation of an automation focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(4): 552-555. (in Chinese)
- [8] 任四刚,李见为,谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术[J]. 光电工程, 2003, 30(2): 53-55.
REN S G, LI J W, XIE L L. Automatic focusing technique based on gray scale difference method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(2): 53-55. (in Chinese)
- [9] 夏经亮,张少军,贺双喜,等. 图像测量中的自动调焦和对准系统的研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(7): 653-655.
XIA J L, ZHANG SH J, HE SH X, et al.. Study on auto-focusing and aiming of imaging measurement system [J]. *Computer Measurement and Control*, 2005, 13(7): 653-655. (in Chinese)
- [10] 鲍歌堂,赵辉,陶卫. 图像测量技术中几种自动调焦算法的对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(1): 121-124, 128.
BAO G T, ZHAO H, TAO W. Algorithm's study on automatic focusing for image measurement technology [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(1): 121-124, 128. (in Chinese)
- [11] 朱孔凤,姜威,王端芳,等. 用高斯非均匀采样解决自动聚焦中的误判[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 910-912.
ZHU K F, JIANG W, WANG D F, et al.. Using gaussian unequally spaced sampling to make automatic focusing

- result correct [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(6): 910-912. (in Chinese)
- [12] 周贤, 姜威. 基于图像边缘能量的自动聚焦算法[J]. *光学技术*, 2006, 32(2): 213-215, 218.
ZHOU X, JIANG W. Auto-focus algorithm based on image edge energy [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 213-215, 218. (in Chinese)
- [13] FU T, GAO M G, HE Y. An improved scatter selection method for phase gradient autofocus algorithm in SAR/ISAR auto focus [C]. *Proceedings of the 2003 International Conference on Neural Networks and Signal Processing, Nanjing, P. R. China: ICNNSP*, 2003, 2: 1054-1057.
- [14] RIGLING B D, MOSES R L. Motion measurement errors and autofocus in bistatic SAR [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(4): 1008-1016.
- [15] JARVIS R A. Focus optimization criteria for computer image processing [J]. *Microscope*, 1976, 24(2): 163-180.
- [16] WOLFGANG, KESSELER, FISCHER J. Analytical model of autofocus systems with CCD camera [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37: 369-375.
- [17] ZHANG Y N, ZHANG Y, WEN C Y. A new focus measure method using moments [J]. *Image and Vision Computing*, 2000, 18(12): 959-965.
- [18] CHERN N K, NATHANIEI P A N, MARCELO H A J. Practical issues in pixel based autofocusing for machine vision [C]. *Proceeding of the 2001 IEEE international Conference on robotics and automation, Seoul, Korea: ICRA*, 2001: 21-26.
- [19] 刘瑞安, 靳世久, 宋维, 等. 单摄像机视线跟踪[J]. *计算机应用*, 2006, 26(9): 2101-2104.
LIU R A, JIN SH J, SONG W, *et al.*. Eye-gaze tracking using one camera [J]. *Computer Applications*, 2006, 26(9): 2101-2104. (in Chinese)

作者简介: 刘瑞安(1966—), 男, 河北赵县人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为检测技术及仪器和图像处理技术。E-mail: wdxylra@mail. tjnu. edu. cn