

文章编号:1002-2082(2018)04-0483-08

应用于一体化摄像机的自动聚焦搜索算法研究

曹永鹏, 辛春辉, 潘青松

(西南交通大学 电气工程学院, 成都 611756)

摘 要:一体化摄像机的自动聚焦过程就是镜头按照自动聚焦搜索算法寻找图像清晰度评价函数最大值的過程,自动聚焦搜索算法对自动聚焦过程的实时性和准确率影响很大。为了解决现有算法在光源场景和无细节场景下聚焦失败的问题,提出了一种基于场景预测的聚焦搜索算法,该算法对成像场景进行智能分析、判断并分类,在不同的场景下采用不同的搜索策略,提高了自动聚焦搜索的稳定性和准确率。同时,针对现有算法在散焦区判断聚焦曲线峰值方向困难的问题,引入模糊度评价模型,该模型能够准确判断聚焦曲线峰值方向,分析实验数据发现,新的算法在散焦区的聚焦速度提升了 24.3%。实验证明,新的算法在基于海思 Hi3518A 处理器搭建的一体化摄像机成像系统中具有很高的应用价值。

关键词:图像信号处理;聚焦搜索算法;自动聚焦;一体化摄像机;聚焦曲线分析;模糊度评价

中图分类号:TN911.73;TP391

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0402001

Study on auto-focusing searching algorithm applied to integrated camera

Cao Yongpeng, Xin Chunhui, Pan Qingsong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The auto-focusing process applied to integrated camera is described as the lens looking for the maximum value of image definition evaluation function according to auto-focusing search algorithm. The auto-focusing search algorithm has a great influence on the focusing time and focusing accuracy of the whole auto-focusing process. In order to solve the problem that the existing algorithms fail to focus under light source scenes and no-detail scenes, a focus search algorithm based on scene prediction is proposed. The algorithm can intelligently analyze, judge and classify imaging scenes, and uses different search strategies in different scenarios to improve the stability and accuracy of auto-focus searching. At the same time, aiming at the problem that the existing algorithm is difficult to determine the direction of the peak of focus curve in defocus area, a fuzzy degree evaluation model is introduced, which can accurately determine the peak direction of the focus curve. Analysis of experimental data shows that the new algorithm has increased the focusing speed in the defocus area by 24.3%. Experiments verify that the new algorithm has high application value in the integrated camera imaging system based on Hi3518A processor.

Key words: image signal processing; focusing searching algorithm; auto-focusing; integrated camera; focusing curve analysis; fuzzy degree evaluation

收稿日期:2017-12-29; 修回日期:2018-01-28

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2017GZ0026)

作者简介:曹永鹏(1992—),男,山西临汾人,硕士研究生,主要从事嵌入式技术、图像处理及一体化摄像机 3A 算法的研究。

E-mail: yongpengcao@163.com

引言

一体化摄像机是指内置光学镜头,具有变倍和自动聚焦功能的摄像机,是光、机、电一体化的高精密设备^[1]。在安防领域中,一体化摄像机应用在球机或云台摄像机上,具有变倍速度快、光学变焦、定位精确、控制方式灵活等特点,已广泛应用于平安城市、机场、智能交通、能源电力、工业、教育等行业^[2]。目前,整个视频监控行业正朝着数字化、网络化、高清化和智能化的方向发展,市场对一体化摄像机的需求呈现上升趋势,一体化摄像机成为视频监控领域的热点。整体来看,自动聚焦算法大致分为图像清晰度评价函数、聚焦窗口选择和自动聚焦搜索算法三个部分。其中,自动聚焦搜索算法是最为关键的一部分,对整个自动聚焦的准确率和聚焦速度起到了决定性的影响。在聚焦电机的搜索范围内,计算每一个聚焦电机位置处的清晰度评价值,以此构成聚焦电机位置和清晰度评价值之间的关系曲线,称为聚焦曲线,聚焦曲线上变化平缓的区域称为散焦区,峰值附近曲线较为陡峭的区域称为聚焦区。聚焦搜索算法就是设计搜索策略并控制执行机构驱动聚焦电机寻找聚焦曲线的峰值位置。受噪声和环境的影响,聚焦曲线容易出现局部极值,且在散焦区曲线有明显的波动,从而导致算法判断峰值方向困难。

国内外很多学者针对这些问题进行了深入的研究,在不同程度上提高了算法的稳定性和搜索速度^[3-10]。胡凤萍^[5]等人提出了一种动态自适应变步长的聚焦搜索算法,采用大步长粗调加小步长细调的渐进式搜索策略,首先大步长搜索找评价值的最大值,再用小步长在该位置附近搜索,直到找到峰值位置为止。这种算法能够避免聚焦电机陷入局部极值,提高了算法的准确度,但是当聚焦电机位于散焦区时,算法寻找峰值的过程类似于左右试探,导致搜索时间相对较长。陈东^[6]等人提出改进的基于模糊推理的聚焦曲线峰值搜索算法,在峰值搜索过程中引入了模糊控制器,该算法可以自适应地调整搜索步长,能够做到在散焦区大步长快速搜索,在聚焦区小步长精确搜索,这种方法显著提高了在散焦区峰值搜索的速度,适用于在整个搜索范围内聚焦曲线变化明显的系统,当散焦区聚焦曲线变化平缓时,该算法无法判

断峰值方向。蒋涛^[7]提出了一种能够在散焦区判断聚焦曲线峰值方向的算法,建立图像模糊度模型,通过图像模糊度评价函数来判断峰值位置相对于当前位置的方向,该算法提高了聚焦搜索的准确率和搜索速度,解决了散焦区判断曲线峰值方向的问题。另外,谢琦^[8]和黄德天^[9]等人从预测聚焦曲线峰值位置的角度出发,分别提出了不同的数学模型,用于估算聚焦曲线峰值的大致位置,这种预测算法不同程度地提高了聚焦的准确率和聚焦速度。

本文认为,现有的算法都存在一种假设前提,即聚焦曲线在各种环境下具备相同的曲线特性,聚焦曲线的走势类似于高斯分布的曲线特性。事实上,在安防视频监控领域,成像环境复杂多变,比如超远距离识别车牌场景、夜晚超低照度场景、夜间面对车灯和路灯的点光源场景、单一无细节信息的墙面场景,在不同的使用场景下,聚焦曲线差别很大,不能简单地将任意场景下的曲线特性都归结为一类曲线,因此使用一种算法难以解决复杂场景下的聚焦问题。本文将一体化摄像机的使用场景分为普通场景、光源场景(场景中存在光源)和无细节场景(场景单一,缺少边缘和细节信息),在不同场景下测试上述算法的聚焦性能,发现现有算法在光源场景和无细节场景下容易出现对焦失败的问题。本文针对以上的问题,以一体化摄像机的自动聚焦需求为导向,分析不同场景下的聚焦曲线特性,提出了一种基于场景预测的聚焦峰值搜索算法,该算法能够智能识别当前场景并归类,针对不同场景选择更为合理的聚焦搜索策略。

1 自动聚焦系统总体结构

本文基于海思 Hi3518A 处理器 SoC 芯片搭建了自动聚焦系统,该芯片是针对安防领域一体化摄像机和网络摄像机 IPCamera 专门打造的专业中低端音视频处理芯片,有高清 720 p 的图像质量,最大帧率 30 fps,支持 H. 264 编码协议,芯片内部集成图像处理模块,其优异的视频图像处理能力使得它在安防一体化摄像机市场上得到了广泛的应用。图 1 是本文设计的自动聚焦系统的总体结构图,图中系统平台主要包括输入视频采集模块、图像处理模块(ISP)、自动聚焦模块、电机驱动模块、视频编解码处理模块、视频输出显示模块 6 个部分。

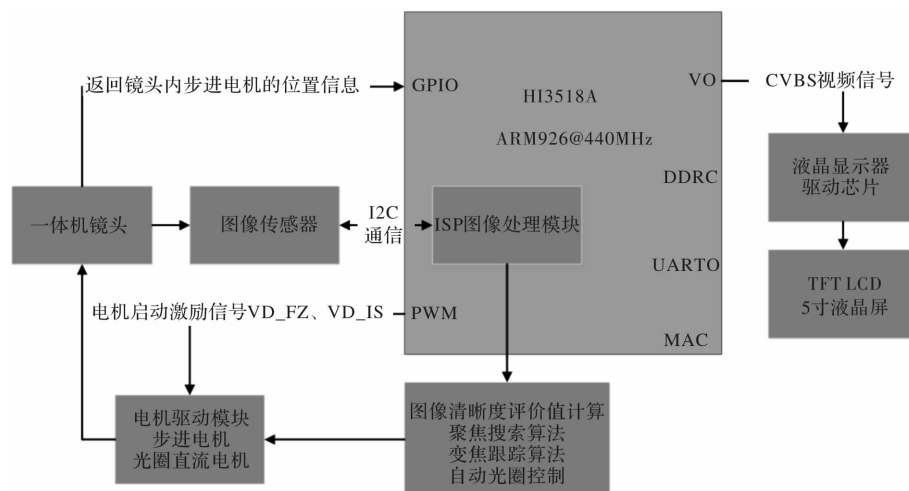


图1 自动聚焦系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of auto-focusing system

当成像物体的光线透过光学镜头经传感器接收信号后,通过A/D转换成数字图像,然后Hi3518A芯片内部的ISP图像处理模块对其进行噪声滤波、自动曝光、自动白平衡、阴影矫正等前期处理,保证输出给自动聚焦模块的图像正常,此时一方面自动聚焦模块提取图像的清晰度评价并根据峰值搜索策略输出步进电机的控制命令,电机驱动模块接收到控制命令之后控制镜头内的电机运动,使得镜头逐步调整到图像清晰的位置;另一方面视频处理模块将处理好的图像进行视频编码,生成CVBS格式的视频信号,通过外接的液晶驱动芯片转换成RGB格式的视频信号,输出到TFT LCD液晶显示屏上,实时查看当前场景的聚焦信息。

2 不同场景下的聚焦曲线特性分析

海思Hi3518A芯片内部的ISP模块集成了AF引擎,AF引擎通过分析图像的灰度差值和高频分量的多少来判断图像的清晰程度,获取到的统计信息即为图像的清晰度评价。AF引擎模块具有运算速度快、可灵活配置的特点,可减少自动聚焦的时间。本系统充分利用AF引擎模块获取图像清晰度评价,不难看出,图像清晰度评价函数是设计聚焦搜索算法的依据,本文认为在设计自动聚焦搜索算法之前,有必要分析现有系统的聚焦曲线。通过分析不同场景下的聚焦曲线特性,从而设计更加合理的搜索策略。

2.1 普通场景下的聚焦曲线特性

图2是使用本系统在普通场景下采集得到的

变焦镜头在7倍、12倍和20倍下的聚焦曲线。通过检测一体化摄像机不同倍率下的多个普通场景,发现聚焦曲线存在如下的特点:

- 1) 在聚焦区,聚焦曲线较为陡峭,具有良好的单调性、单峰性且没有局部极值;
- 2) 在散焦区,聚焦曲线有波动,存在局部极值,曲线较为平缓,甚至清晰度值没有变化;
- 3) 在大倍率下,曲线在很窄的范围内才具有明显走势,且搜索范围大;在小倍率下,曲线在焦点两侧的较大范围内具有明显走势,且搜索范围小。

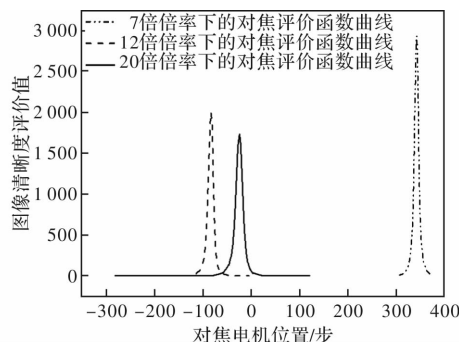


图2 不同倍率下的聚焦曲线图

Fig. 2 Focusing curves under different magnifications

通过以上的分析可知,变焦电机处在较大倍率下时,聚焦电机很容易出现在散焦区内,判断聚焦曲线的峰值相对当前聚焦电机位置的方向变得非常困难,因此本文采用基于图像模糊度评价的方法来判断方向^[11],从而缩短现有算法因盲目搜索而造成的时间浪费。

图像的模糊度和图像清晰度一样,也是表征图像信息的一个重要因素。对一幅图像在清晰状

态和不同模糊程度状态下的灰度分布情况进行256阶的直方图统计。分析这些灰度直方图统计信息发现,图像越模糊,直方图越向均值附近集中,因此可以利用直方图上图像灰度均值附近灰度值出现的概率来表征图像的模糊程度。定义模糊度评价 s 如下^[11]:

$$s = \sum_{x_i=0}^{255} p(x_i)w(x_i) \quad (1)$$

$$w(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i}{x_{av}} & x_i < x_{av} \\ \frac{255-x_i}{255-x_{av}} & x_i \geq x_{av} \end{cases} \quad (2)$$

(2)式中: x_i 是图像的灰度级; x_{av} 是图像的灰度均值; $w(x_i)$ 是灰度值 x_i 在计算集中度时对应的权值。(1)式中 $p(x_i)$ 是 x_i 在图像中出现的概率。根据此式即可得到当前图像模糊度评价价值,该评价价值越大说明图像越模糊。

当聚焦电机处在散焦区时,启用模糊度评价函数计算相邻两个聚焦电机位置处(假设为 focus_pos1 和 focus_pos2 ,且 $\text{focus_pos1} > \text{focus_pos2}$)的图像模糊度评价价值(假设分别为 fz1 和 fz2),比较 fz1 和 fz2 的大小,如果 $\text{fz1} > \text{fz2}$,说明 focus_pos1 的位置相对模糊,图像清晰点的方向应该是由 focus_pos1 指向 focus_pos2 位置的方向,否则为相反的方向。通过这种方法确定了聚焦曲线峰值的方向。

2.2 无细节场景下的聚焦曲线特性

图3是无细节场景下聚焦曲线,图4是本文实际拍摄的无细节场景图。

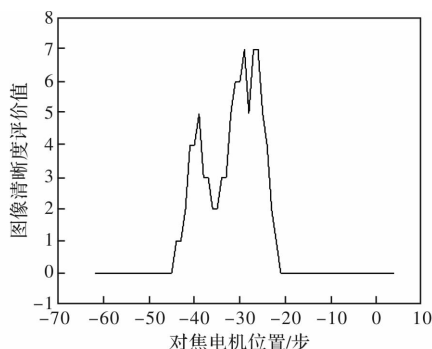


图3 无细节场景下的聚焦曲线图

Fig. 3 Focusing curve in single scene

在无细节场景下,由于场景中缺少细节信息,没有明显的边缘,图像灰度变化较为平缓,导致图像在频域中对应的高频成分相对较少,而本文的图像清晰度评价函数就是基于频域内的高频部分

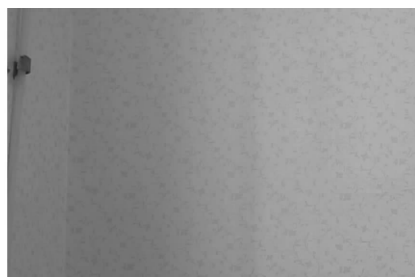


图4 无细节场景图

Fig. 4 Photo single scene

计算得来的,这就会导致聚焦区内的图像清晰度评价价值也很小,聚焦电机搜索时仅仅在很小的范围内清晰度评价价值不为零,聚焦曲线没有峰值,且曲线不单调,在这种情况下如果使用传统的聚焦搜索策略,将导致聚焦失败。

2.3 光源场景下的聚焦曲线特性

图5是点光源场景下的聚焦曲线图,图6是实际拍摄的典型光源场景图。

实际的聚焦清晰点是图5中A点所示的聚焦电机位置,但图5中A位置的聚焦评价价值不是峰值。在与A点间距相等的前后两个位置,存在伪峰值点B点和C点,如果采用传统的基于图像清晰度评价价值的聚焦搜索策略的话,极有可能聚焦至B点或C点,从而导致聚焦失败。

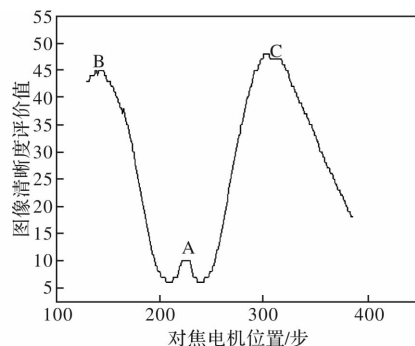


图5 光源场景下的聚焦曲线图

Fig. 5 Focusing curve in light source scene

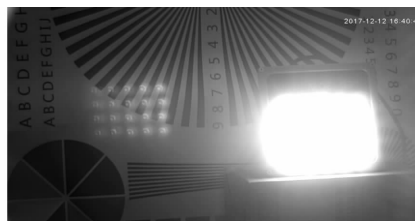


图6 光源场景图

Fig. 6 Photo light source scene

根据成像系统的原理^[12-13],当点光源越远离图像最清晰点时,光源越模糊而显得较大,所以距

离聚焦点越远则图像的边缘区域越多,结果导致计算出来的清晰度评价与聚焦点相比成为更大的值,所以就会表现出图5所示的曲线特性。因此在点光源场景下不能使用图像的清晰度评价值来作为聚焦搜索算法的依据。

不难想到,存在光源的场景中,由于图像越模糊,光源显得越大,就会导致整帧图像中高亮度像素的数量增多。因此,当算法识别出当前场景中存在光源时,可以建立当前图像的高亮度像素个数统计值与聚焦电机位置的关系曲线,本文简称HI-CUT曲线。典型的曲线如图7所示。

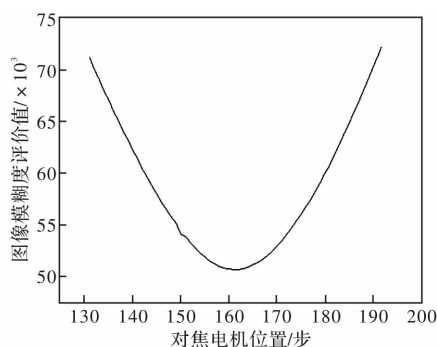


图7 HI-CUT曲线

Fig. 7 HI-CUT curve

分析 HI-CUT 曲线不难得出,在光源场景下,在每一个聚焦电机位置处计算图像的高亮度像素个数的统计值,通过寻找最小值即可找到图像最清晰点,然后驱动聚焦电机前往该位置即可完成聚焦。

3 基于场景预测的聚焦搜索算法

在装有变焦镜头的一体化摄像机中,通常都会有变焦跟踪的过程^[14],变焦跟踪的目的是确保镜头在变焦过程中,调焦电机能根据一定的规则跟踪变焦电机一起运动,保证图像相对清晰,该规则就是变焦跟踪算法(zoom tracking algorithm),本文中所谈及的自动聚焦过程是在变焦跟踪停止之后启动的。

分析聚焦曲线的特性发现,聚焦曲线在不同场景下表现出不同的特性,本文针对3种场景的特性设计了差异化的搜索策略,图8是本文提出的基于场景预测的聚焦搜索算法流程图。

聚焦搜索算法开始之后,首先通过场景预测模块预测当前场景,场景预测模块分析图像的64段灰度直方图的特征,从而判断当前所处的场景。

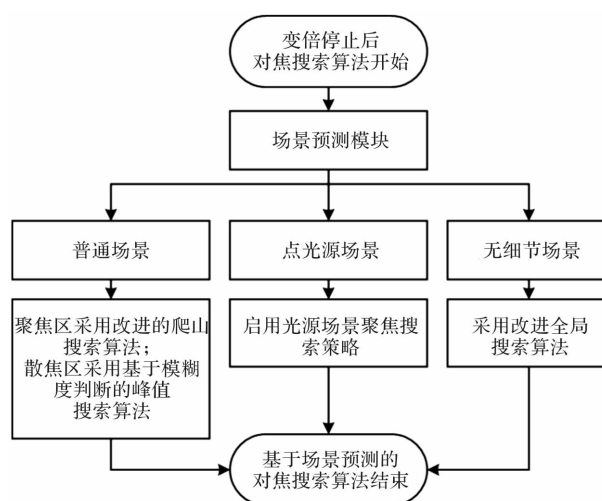
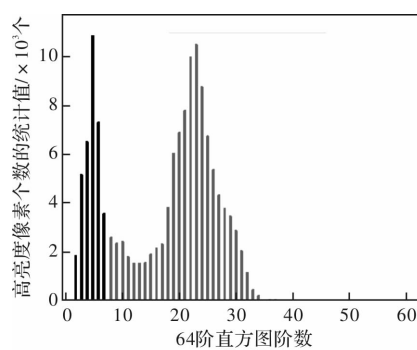


图8 基于场景预测的聚焦搜索算法流程图

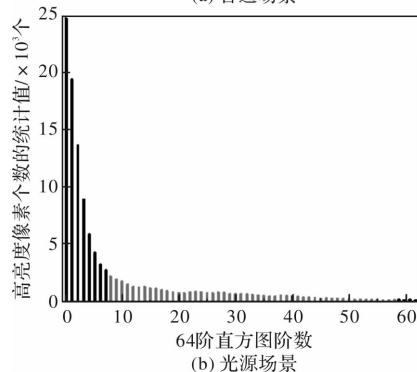
Fig. 8 Flow chart of focus search algorithm based on scene prediction

从图像处理模块提取一帧图像的256阶灰度值的统计信息,将256阶灰度值划分为64段的直方图数据,即64段直方图的第0段代表的是灰度值为0~3的所有像素的总和,以此类推即得到64段直方图每一段的统计值。取前面0~8段划分为暗区,8段~59段设定为正常区,59段~63段划分为亮区。

图9是在不同场景下采集得到64段直方图,分别是普通场景、光源场景和无细节场景。由此可以看出,对于光源场景,直方图中的亮区和暗区像素比较集中,而普通场景和无细节场景下,直方图的较大值一般落在正常区。



(a) 普通场景



(b) 光源场景

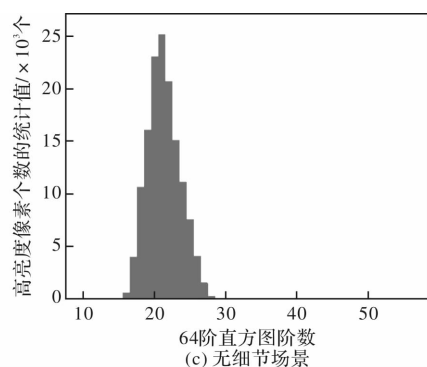


图9 不同场景下的64段直方图

Fig. 9 64 segment histogram in different scenes

基于这些特性,通过分析直方图中较大值所处的区域,就可以判定出光源场景。当直方图的较大值集中出现在亮区和暗区时,代表当前场景为光源场景,否则为非光源场景;对于非光源场景,通过设定图像清晰度评价值的阈值 K ,当评价值大于 K 时判定为普通场景,当评价值小于 K 时判定为无细节场景。至此,场景预测模块主要是通过判断直方图的较大值落在哪个区域来将场景分为光源场景和非光源场景,进一步的,对于非光源场景,通过设定清晰度评价值的阈值来区分普通场景和无细节场景。

当处在普通场景下的聚焦区时,采用改进的爬山算法^[3],连续采集3个调焦电机位置对应的清晰度评价值,通过3个评价值的单调性判断聚焦曲线峰值方向,然后以最小步长爬山走到峰值位置完成聚焦;当处在普通场景下的散焦区时,通过模糊度评价模块判断聚焦曲线峰值方向,紧接着以大步长朝着峰值方向走,同时记录每一个位置的清晰度评价值,当越过大步长采集状态下的清晰度评价值的最大值时,停止运行,此时聚焦电机处在聚焦区,换成最小步长,然后聚焦电机向反方向走,再次爬山寻找聚焦曲线峰值^[3]。

在光源场景下,启用光源场景聚焦模块,在当前聚焦电机位置处,该模块首先获取一帧图像中每个像素点的灰度值,利用高亮度像素计数器模块统计整帧图像中高亮度像素的个数,通过统计多个聚焦电机位置处的统计值得到 HI-CUT 曲线,紧接着通过反向爬山的方式搜索 HI-CUT 曲线的最小值,HI-CUT 曲线的最小值位置即为聚焦清晰点。

在无细节场景下,采用改进的全局搜索算法寻找清晰点即可。首先聚焦电机以大步长在整个

聚焦范围内采样获取清晰度评价值,由此可以找出清晰度评价值最大值的位置,记为 focus_pos_max ,设定在 focus_pos_max 位置处临近的前后8步的范围($[\text{focus_pos_max}-8, \text{focus_pos_max}+8]$)以小步长统计每一个聚焦电机位置处的清晰度评价值,找到清晰度评价值的最大值,该值位置就是清晰点位置。

4 实验验证与数据分析

本文根据图1所示的自动聚焦系统的总体结构搭建了实验平台,硬件部分主要包括:舜宇光学公司的20倍光学变焦镜头、Aptina公司推出的AR0130 CMOS感光元件、基于Hi3518A SoC芯片/DDR3内存芯片/NOR Flash存储芯片设计的PCB板、Panasonic公司的马达驱动芯片AN41908A、液晶驱动芯片RTD2660H、5寸液晶显示屏TFT LCD。由以上硬件设计了硬件电路板,同时,建立板端与上位机服务器的网络通信和串口通信,在服务器Ubuntu14.04上开发程序,交叉编译生成可执行程序,通过网络将程序移植到板端。通过串口终端控制板端的应用程序发送控制命令,以此完成了自动聚焦算法的编程实现和实验调试任务。

4.1 自动聚焦搜索算法的评价标准

聚焦曲线峰值搜索算法的优劣评判标准主要根据以下3个方面:

1) 搜索速度 T : 搜索速度是指算法从开始运行到最终聚焦清晰结束之后的时间,这个时间由步进电机运行速度、搜索范围大小、搜索过程中采集图像的次数和搜索策略共同决定;

2) 聚焦准确率 S : 在不同的场景下,聚焦曲线呈现不同的特性,如果搜索算法过于单一,有可能导致聚焦失败,所以,需要设计实验方案,比较不同算法在各种场景下的聚焦情况,多次测量得出聚焦准确率;

3) 稳定性: 一体化摄像机多用于视频监控场景,设备往往会长时间连续运行,随时可能触发自动聚焦模块,这就要求算法应该充分考虑边界问题,避免算法陷入死循环导致摄像机死机等。

4.2 实验方案与结果分析

为了比较本文设计的基于场景预测的聚焦搜索算法在搜索速度 T 、聚焦准确率 S 和稳定性方面的优势,从算法的实用性角度考虑,选取了改进

的全局搜索算法、基于模糊推理的聚焦搜索算法^[6]和本文提出的基于场景预测的聚焦搜索算法进行算法性能的比较。

对于聚焦准确率,本文设计在3种不同的场景下比较算法的准确性,在变焦镜头的不同倍率和成像物体的不同物距下完成。

在普通场景的聚焦区和散焦区,分别进行100次的反复测试,发现3种算法在聚焦区的聚焦准确率一样,均没有出现聚焦失败的现象;在散焦区,基于模糊推理的聚焦搜索算法偶尔会出现聚焦失败的现象。在光源场景下,进行50次的反复测试,发现全局搜索算法和基于模糊推理的聚焦搜索算法聚焦失败,不适合当前场景,而本文提出的算法在此环境下能够准确聚焦。在无细节场景下,进行50次的反复测试,发现基于模糊推理的聚焦搜索算法聚焦准确率 $S=78\%$,远低于改进的全局搜索算法和本文提出的算法 $S=98\%$ 的准确率。

对于聚焦搜索的速度,结合高清一体化摄像机的实际应用,在无细节场景和光源场景下的聚焦搜索算法更关注聚焦准确率和稳定性,聚焦速度是普通场景下关注的算法指标。当聚焦电机处在普通场景的聚焦区时,基于模糊推理的聚焦搜索算法和本文设计的算法都采用了相同的搜索策略,都是采取了改进后的爬山搜索算法,而全局搜索算法由于搜索范围较大,导致其聚焦时间很长,算法的优劣显而易见,因此,本文不做对比性的实验。

本文着重比较算法在散焦区时的聚焦时间,让镜头处在最大光学倍率的位置,固定物距,同时让聚焦马达运动至散焦区的某个固定位置,设计这些条件的目的是保证对比实验具有相同的外部条件。表1是3种聚焦搜索算法的搜索时间比较表,其中显示的数据是50次重复试验得到的平均值。

表1 聚焦搜索算法的搜索时间比较表
Table 1 Search time comparison of auto-focusing search algorithm

场景	算法类型	评价值的 计算次数	平均对焦 时间 /ms
普通场景 (离焦区)	改进的全局搜索算法	114	5 160
	基于模糊推理的对焦 搜索算法	85	3 496
	基于场景预测的对焦 搜索算法	47	2 646

分析表1的实验数据,发现基于场景预测的聚

焦搜索算法搜索时间明显优于全局搜索算法和基于模糊推理的聚焦搜索算法,搜索时间相比于模糊推理的聚焦搜索算法提升了24.3%,而且算法采集图像计算清晰度评价值的次数也明显少于另外两种算法,降低了算法的复杂度。另外,在前述的多次重复实验中,本文算法在不同场景下都能保持长时间的稳定运行,没有出现死机的情况,稳定性良好。

5 结论

一体化摄像机面对的监控场景复杂多变,经过实验验证,发现现有的自动聚焦搜索算法往往在光源场景和无细节场景下聚焦失败,同时在聚焦电机位于聚焦曲线的散焦区时存在判断峰值方向困难的问题。本文针对以上问题,提出了一种基于场景预测的自动聚焦搜索算法,该算法能够智能识别场景并作出判断,针对光源场景提出利用图像高亮度像素统计值作为聚焦搜索的依据;针对无细节场景,提出了改进的全局搜索策略;针对普通场景聚焦电机位于散焦区时判断方向困难的问题,提出了采用模糊度评价模型判断峰值方向的办法。

总的来说,基于场景预测的自动聚焦搜索算法应用范围更广,聚焦准确率明显优于现有算法,稳定性更好,聚焦速度有了明显的改善,能够满足一体化摄像机自动聚焦实时性和稳定性的要求。同时,本文提供了一种移植性强的自动聚焦系统方案,旨在促进一体化摄像机的技术创新发展。

参考文献:

[1] ZHANG Bo, ZHANG Gang, CHENG Yongqiang. Design of zooming control system in integrated camera[J]. Video Engineering, 2010, 34(6):38-40.
张博, 张刚, 程永强. 一体化摄像机变焦控制系统的设计[J]. 电视技术, 2010, 34(6):38-40.

[2] SU Zhenwei. Design and implement of 5MP HD camera[J]. Electronic Engineering & Product World, 2014(7):15-17.
苏振伟. 5MP 一体化高清机芯的设计与实现[J]. 电子产品世界, 2014(7):15-17.

[3] 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

- (2):257-262.
- [4] CHIU L C, FUH C S. An efficient auto focus method for digital still camera based on focus value curve prediction model[J]. J. Inf. Sci. Eng., 2010, 26(4): 1261-1272.
- [5] HU Fengping, CHANG Yilin, MA Yanzhuo, et al. Development of the video automatic focus method[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(10): 1901-1906.
- 胡凤萍, 常义林, 马彦卓, 等. 视频自动聚焦的实现研究[J]. 光子学报, 2010, 39(10):1901-1906.
- [6] CHEN Dong. Research on digital image auto-focus technology for zoom camera[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014:42-49.
- 陈东. 一体化摄像机的数字图像自动聚焦技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014:42-49.
- [7] JIANG Tao, ZUO Fang, WANG Lingguo. Achievement of auto-focusing in severe defocused state[J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 794-797.
- 蒋涛, 左昉, 王灵国. 严重离焦状态下的自动聚焦实现[J]. 激光技术, 2015, 39(6):794-797.
- [8] XIE Qi, ZHANG Guang. Automatic focusing algorithm based on difference equation prediction model[J]. Computer Applications & Software, 2015(12): 270-273.
- 谢琦, 张广. 基于差分方程预测模型的自动聚焦算法[J]. 计算机应用与软件, 2015(12):270-273.
- [9] HUANG Detian, LIU Xuechao, ZHANG Hongsheng, et al. Fast auto-focusing method based on human visual system[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals & Displays, 2014, 29(5):768-776.
- 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.
- [10] Chen Jian, Wang Lingyang, Chen Dequan, et al. Design of microscope system based on depth from focus[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 979-984.
- 陈健, 王灵阳, 陈德全, 等. 基于对焦深度法的光学显微镜系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 979-984.
- [11] PANG Shengli. The research on image blur assessment[D]. Xi'an: Xidian University, 2010:21-42.
- 庞胜利. 图像模糊度评价研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010:21-42.
- [12] TAO Jinyou. Study on the auto-focus algorithms based on image processing and its system realization[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2014: 5-9.
- 陶金有. 基于图像处理的自动调焦算法研究及系统实现[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014: 5-9.
- [13] HUANG Detian. Study on auto-focusing method using image technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013:95-102.
- 黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013:95-102.
- [14] LIN Zhong, HUANG Chenrong, LU Ali. Zoom tracking for big magnification surveillance[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 684-690.
- 林忠, 黄陈蓉, 卢阿丽. 应用于大变倍监控摄像机的电动变焦跟踪[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 684-690.