

一种基于能量和熵的自动聚焦算法

康宗明, 张 利, 谢 攀

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文提出了一种基于能量和熵的自动聚焦算法. 在讨论镜头系统造成图像模糊原理的基础上, 提出以空域高频能量和熵作为图像清晰度判据并详细分析了判据性能, 针对传统的 MCS 聚焦流程所固有的局限性, 引入了方向测试帧概念, 通过联合使用多种清晰度判据以及步长的自适应调整策略提高了自动聚焦的可靠性、聚焦速度以及聚焦灵敏度. 本算法应用在作者开发的高清晰度图像采集系统中, 试验结果证明所提出的判据和实际聚焦过程吻合, 基本避免了原有聚焦算法的缺陷.

关键词: 自动聚焦; 空域高频能量判据; 熵判据; MCS; 方向测试帧

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 04-0552-04

Implementation of an Automatic Focusing Algorithm Based on Spatial High Frequency Energy and Entropy

KANG Zong-ming, ZHANG Li, XIE Pan

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new advanced automatic focusing algorithm is proposed. After discussing the principle how image is blurred by the lens system, we presented spatial high frequency energy and entropy as the sharpness criteria and analyzed their performance detailedly. Aiming at the limitation of conventional MCS, the concept of direction-test frame is proposed. The reliability, speed and sensitivity of auto focus are enhanced by using more definition criteria together and self-adjust step. The proposed algorithm has been successfully tested to be effective on a high definition image processing system developed by the authors. Experimental results demonstrate that the new criteria work according to the fact and the proposed algorithm.

Key words: auto focus; spatial high frequency energy criterion; entropy criterion; MCS; direction-test frame

1 引言

图像采集系统中为了获得清晰的图像, 焦距的调节至关重要. 自动聚焦的实现使采集系统具备一定的智能, 在特殊应用中更可以代替手动调节, 譬如无人视频监控系统中焦距的调节、医学显微镜下焦距的调节等等. 自动聚焦不但使用更方便, 而且调节速度和灵敏度要比手动调节更快更高.

从实现方式来看, 自动聚焦有主动和被动两种方式. 主动方式指通过相应的方法测距, 利用一定的数学模型计算当前的精确焦距从而完成调节, 该方式需要额外的测距设备, 适用范围相对较小. 被动方式指利用所获取图像的自有信息分析聚焦方向, 通过反复调整最终调节焦距到最佳位置. 对被动方式而言, 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. 本文在前人研究的基础上^[1~4], 探讨了图像在散焦系统中模糊的原因, 从能量和熵两个角度详细分析了焦距调节判据的选取和特点, 并且根据实际应用的需要对原有的自动聚焦流程“爬山法”(Mountain

Climbing Servo, MCS) 做了一定的改进, 试验证明, 改进后算法在聚焦可靠性、速度以及聚焦精度上均有较大提高.

2 镜头系统分析

真实景物经镜头成像后变模糊的原因是研究自动聚焦的基础, 详细分析图像模糊的过程对自动聚焦的实现有很大的指导意义. 物体可以看做是呈二维分布的许多点光源, 这样, 物体通过镜头系统的成像是分布在空间的 PSF 光斑 (Point Spread Function, 即由点光源形成的像) 的叠加, 因为一个镜头系统可以合理地近似为平移不变的线性系统, 那么就可以把像描述为物体与光学系统 PSF 的卷积. 一个简单的等价的镜头系统图 1 所示. 当像平面位于 A 位置时, 聚焦最为准确, 成像光斑最小, 而当像平面向两边偏离位置 A (如位置 B 和 C) 时, 成像光斑变大, 偏离越远, 光斑越大. 这样对物体而言, 散焦状态下相邻像素之间会相互影响, 从而造成成像后细节成分的丢失.

相关文献^[1]里详细分析了镜头系统的 PSF, 假定与 PSF

收稿日期: 2001-10-15; 修回日期: 2002-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60172027)

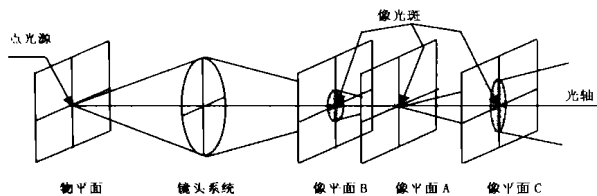


图1 镜头系统点光源成像示意图

的卷积在物平面上进行,以实际非相干光源下圆形孔径的PSF为例,设光源为中心波长为 λ 的窄带非相干光源,圆形孔径直径为 a ,如图2所示。

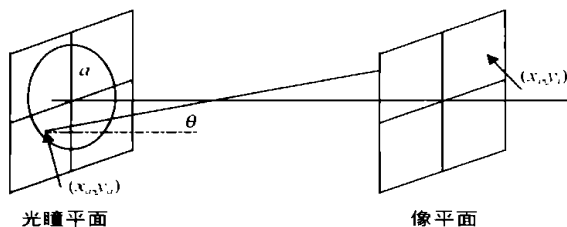


图2 圆形孔径的PSF分析示意图

它的PSF为:

$$h(r) = \left[2 \frac{J_1 \left[\frac{r}{r_0} \right]}{\left[\frac{r}{r_0} \right]} \right]^2$$

其中常量 r_0 为一量纲的比例因子, $r_0 = \frac{d_i}{a}$, d_i 为光瞳平面到像平面的距离, $J_1(x)$ 是第一类型的一阶贝塞尔函数。 r 是距平面光轴的径向距离, $r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$, 如图3所示。

根据以上分析镜头系统PSF等价于一个低通滤波器,不同散焦情况下该滤波器的截止频率不同。聚焦越准确,截至频率越高;散焦越厉害,截至频率越低。从空域来讲,点光源成像之后成为有一定大小的像斑,相邻像素之间互相影响;从频域来讲,高频分量的流失造成图像细节的模糊。一般情况下散焦程度可以用图像高频分量的损失来衡量。

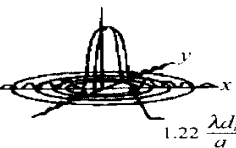


图3 PSF示意图

3 自动聚焦判据分析

自动聚焦算法首先面对的是如何判断一副图像是否清晰的问题,即图像清晰度判据的获取。从镜头成像过程分析来看,图像模糊的本质是高频分量的损失。散焦越严重,图像越模糊,高频分量损失也就越严重。传统的寻找判据的出发点就是按照相应规则计算图像中的高频分量。对高频能量的分析和计算可以从空域和频域两部分来考虑。简单的可以用梯度能量作判据^[2],文献[3]提出了利用拉普拉斯模板卷积的方法获得判据,文献[4]提出了基于DCT变换来获得判据,文献[5]提出了基于小波变换来获得判据。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,这两项将对自动聚焦的灵敏度和速度产生影响。本文从镜头系统造成图像模糊的基本原理出发提出了两种衡量图像清晰度的方法,针对频域高频能量的损失提出了空域高频能量判据,针对空域

相邻像素之间的相互影响提出了熵判据。判据性能分析针对以固定微小步长连续调焦情况下得到的从模糊到清晰再到模糊的图像序列 $P_n(m, n)$ 进行。

3.1 空域高频能量判据

从人眼感觉来看清晰图像相对于模糊图像的差别在于清晰图像的边沿清楚,细节丰富,即人眼以图像的锋利性测度(sharpness)作为判断图像清晰度的标准。从镜头系统的分析来看,由于散焦和PSF本身的宽度造成了相邻像素之间的相互影响,使得图像高频分量丢失。距离中心像素越远,对中心像素影响越小。设中心像素为 $p(i, j)$, 选取 3×3 的邻域,如图4所示。

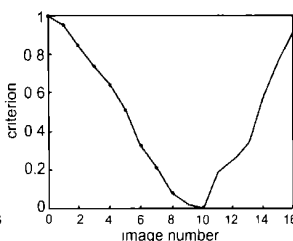
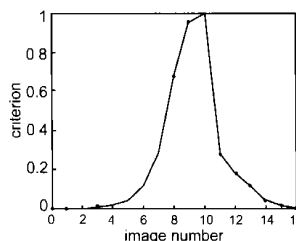
$$\begin{matrix} p(i-1, j-1) & p(i-1, j) & p(i-1, j+1) \\ p(i, j-1) & p(i, j) & p(i, j+1) \\ p(i+1, j-1) & p(i+1, j) & p(i+1, j+1) \end{matrix}$$

图4 计算空域高频能量判据的 3×3 邻域

考虑到像素之间的影响是相互的,所以对 $p(i, j)$ 不需要计算所有相邻像素。又考虑到距离中心像素距离不同,各个相邻像素对中心像素的影响不同,影响大小可以通过不同的比例因子来调整。此处选取左上部分相邻像素,行或列相邻像素影响比例因子为1,对角线相邻像素影响比例因子为0.5,定义空域高频能量判据如下:

$C_s = 2 * \sum_i \sum_j \left[0.5 * (p(i, j) - p(i-1, j-1))^2 + (p(i, j) - p(i-1, j))^2 + 0.5 * (p(i, j) - p(i-1, j+1))^2 + (p(i, j) - p(i, j-1))^2 \right]$

对以固定微小步长连续调焦情况下得到的从模糊到清晰再到模糊的图像序列 P_n 分别计算 $C_s(n)$, 归一化后图示如图5所示。

图5 空域高频能量判据 C_n 曲线 图6 熵判据 C_n 曲线

由此可以得到空域高频能量判据的性质:

① C_n 曲线呈开口向下抛物线形状,具有唯一最大值,最大值点两边都具有单调性。

② 曲线最大值点对应最清晰的一帧图像,即可以通过寻找最大值来寻找准确聚焦位置。

③ 曲线在最大值点附近陡峭,远离最大值点时趋于平缓;即判据在准确聚焦位置附近灵敏度较高,而当远离准确聚焦位置时,判据灵敏度降低。

④ 判据运算复杂度小。

3.2 熵判据

同样照明情况下景物不变时,如果镜头系统光圈不发生变化,那么调节焦距不影响系统的采光性能。从这一角度来看,成像过程可以理解为一一定量的光能量在像平面上的随机

分布,由于散焦以及镜头系统所固有的 PSF 宽度在不同焦距下将形成不同的光能量分布,我们可以通过图像的信息熵来衡量图像的清晰度。散焦越严重,相邻像素之间的影响越大,该焦距下图像的光能量分布相对于清晰图像时趋于平均分布。从熵的概念来说,均匀分布时熵最大,所以当图像最清晰时熵最小,而图像变模糊时,熵将增大。

设 $p(i, j) = E_0$ (E_0 为常数), 定义熵判据如下:

$$C_h = - \sum_{i,j} \frac{p(i,j)}{E_0} \log \left[\frac{p(i,j)}{E_0} \right]$$

$$= - \sum_{i,j} p(i,j) \log p(i,j) / E_0 + \log E_0$$

对以固定微小步长连续调焦情况下得到的从模糊到清晰再到模糊的图像序列 P_n 分别计算 $C_h(n)$, 归一化后图示如图 6 所示。

由此可以得到熵能量判据的性质:

⑧ 整个 C_n 曲线呈开口向上抛物线形状, 具有唯一谷值, 谷值点两边都具有单调性。

⑨ 曲线波谷点对应最清晰的一帧图像, 即可以通过寻找最小值来寻找准确聚焦位置。

⑩ 曲线在整个范围内都有一定的陡峭程度, 即判据在准确聚焦位置附近或者偏离较远时一直保持较高的灵敏度。

⑪ 考虑到图像量化过程中灰度级有限, 所以实际计算过程中对数运算可以通过查表求得。判据运算复杂度小。

4 自动聚焦流程分析

连续调焦过程中, 图像由模糊到清晰再到模糊。反映在相应的清晰度判据上即 C_n 曲线表现为抛物线形状, 曲线有单峰(谷), 且峰(谷)两侧都具有单调性。这样, 可以通过寻找判据的最大(小)值来确定准确聚焦位置。传统的 MCS (Mountain Climbing Servo, 爬山法或登山法) 即是根据这一原理提出。它的基本流程如图 7 所示。

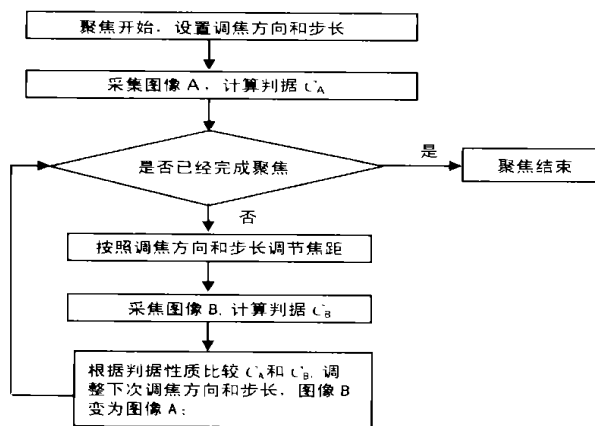


图 7 传统 MCS 聚焦流程

传统的 MCS 具有一定的局限性。第一, 分析流程可以知道, 传统的 MCS 通过比较计算得到的当前图像和调节前图像的判据来修改调焦方向和调节步长, 这就要求两幅图像在判据上满足 C_n 曲线, 在拍摄静止图像时该关系是满足的, 但是当拍摄内容改变时(可能由镜头或者物体的运动引起), 由

于调节焦距需要一定时间这种关系不一定能够保持, 聚焦会发生错误。第二, 调整聚焦方向时如果两幅图像位于峰值两侧, 由于两边的对称性可能会造成一次误判, 影响调焦速度。第三, 自动聚焦算法要求聚焦速度快, 聚焦精度高, 但现有的判据不能同时满足这两方面的要求, 以前面提出的空域高频能量判据为例, 它在准确聚焦位置附近有良好的灵敏度, 但是远离准确聚焦位置时判据灵敏度变差, 甚至可能失效。

针对以上局限性, 本文提出了改进的 MCS 方法, 如下:

(1) 引入方向测试帧概念。为了避免第一种局限性, 即需要保证要比较的两幅图像的内容基本相同。这和图像的采集速度以及调焦速度都有关系。在保证图像采集速度的前提下, 传统的 MCS 中镜头的焦距调节响应时间是造成图像内容变化的主要原因, 大步长调节时, 前后两幅图像内容很可能有较大改变。在此处引入方向测试帧的概念, 即在每次调整下次调焦方向和步长时, 先采集图像 A, 然后以测试步长微调焦距, 再采集图像 B, 由于此处是微调, 采集两幅图像之间的时间减少, 图像内容变化减少。这样虽然从全局来看, 图像内容发生了变化, 但是在调节焦距时能够保证内容不变, 从而保证判据和焦距的抛物线曲线关系, 如果物体景深不变, 判据保持有效。而且因为在判断下次聚焦方向和步长时通过微调焦距来获得图像, 这样同时也避免了传统 MCS 的第二种局限性。

(2) 在不同聚焦位置使用不同的判据, 即联合使用判据。不同的判据在不同区域有不同的性质, 如果全局使用同一判据在某些部分可能失效或者影响聚焦速度和灵敏度。从上面的分析可以看出, 空域高频能量判据明显在散焦较大时曲线趋于平滑, 灵敏度降低, 但在准确聚焦位置附近曲线陡峭, 灵敏度高; 熵判据在整个范围内有较好的灵敏度, 但是在准确聚焦位置灵敏度不及空域高频能量判据, 运算复杂度也偏大。改进后的 MCS 通过判断当前焦距位置选择不同的判据来进行分析, 即在远离准确聚焦位置时采用熵判据, 在准确聚焦位置附近采用空域高频能量判据, 这样可以避免传统 MCS 的第三种局限性。算法在保证聚焦速度和灵敏度的同时, 可靠性也得到了保证。一种简单的策略是开始时使用空域高频能量判据, 焦距调节过程中第一次越过峰(谷)值点时换用熵判据。

(3) 自适应步长调整策略、数据窗口以及其他细节问题。焦距调节过程中步长的调整对聚焦速度有很大影响。当初始位置偏离准确聚焦位置较远时, 如果初始调整步长设置较小, 传统的 MCS 将耗费较多时间才能到达准确聚焦位置附近。改进的 MCS 修改了步长调整策略, 即从开始调整到第一次过峰值, 调整步长在小于最大限制步长的前提下, 自适应增加, 而每次过峰值之后, 调整步长减为原来的一半。测试步长也根据当前采用的判据灵敏度进行修正。为了提高聚焦速度, 计算判据时可以选择一定窗口范围内的数据而不用对整幅画面进行计算, 窗口范围内的物体的景深将影响系统的聚焦, 譬如当同一画面上即有远景又有近景时, 选择的窗口不同, 聚焦效果就不同。一般选择画面中心一定大小的数据窗口, 或者根据特殊需要调节。算法还需要合理设置调焦起始位置, 当焦距从最小到最大都不能准确调焦, 即所有焦距都位于准确聚焦位置一侧此时“爬山法”爬不到山顶, 必须恰当的终止自动聚焦。

改进后的 MCS 的基本流程和聚焦过程示意图如图 8 所示.

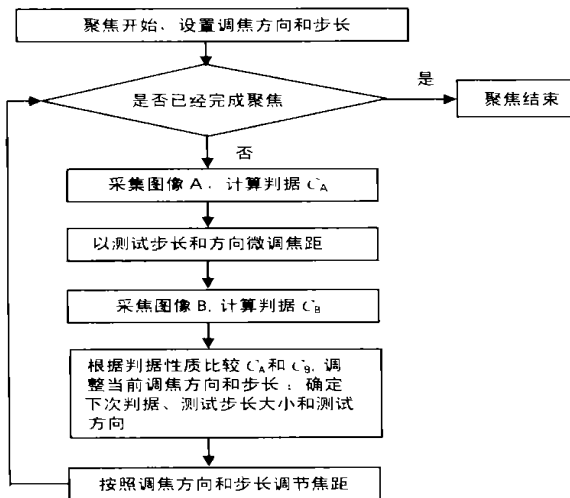


图 8 改进后的 MCS 聚焦流程

5 结果与结论

本文讨论了镜头系统造成图像模糊的基本原理,并据此提出以空域高频能量和熵作为图像清晰度判据,针对连续调焦得到的序列图像详细分析了判据性能.在此基础上针对传统的 MCS 聚焦流程所固有的局限性,引入了方向测试帧概念,通过联合使用多种清晰度判据以及步长的自适应调整策略提高了自动聚焦的可靠性、聚焦速度以及聚焦灵敏度.在作者开发的高清晰度图像采集系统中采用并试验了该算法的性

能.从实际试验效果来看,所提出的判据和实际聚焦过程吻合,与传统的 MCS 算法相比,改进后的 MCS 聚焦速度加快,聚焦灵敏度提高,系统正确聚焦的可靠性好,基本避免了原有聚焦算法的缺陷.

参考文献:

- [1] Castleman K R. Digital Image Processing [M]. 北京:清华大学出版社,1998. 351 - 386.
- [2] Je-Ho Lee, Kun-Sop Kim. Implementation of a passive automatic focusing algorithm for digital still camera [J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 1995, 41 (3): 449 - 454.
- [3] Robert L. Automatic Focusing System [P]. United State Patent, 1989: N4. 814 - 889.
- [4] Baina J, Dublet J. Automatic focus and iris control for video cameras [A]. Image Processing and its Applications [C]. Fifth International Conference, 1995. 232 - 235.
- [5] Widjaja J, Jutamulia S. Wavelet transform - based autofocus camera systems [J]. Circuits and Systems, 1998, Page (s): 49 - 51.

作者简介:

康宗明 男,1975 年生于陕西省,1999 年本科毕业于清华大学电子工程系,同年继续攻读清华大学电子工程系硕士研究生,研究方向为图像和视频信号处理.

张利 男,1965 年生于山东省,1987 年毕业于清华大学无线电电子学系,1992 年取得清华大学电子工程系硕士学位后留校任教,现主要从事图形图像教学和科研任务,副教授,研究方向为图像监控与传输等. Email: zhangli @graphics. ee. tsinghua. edu. cn.