

分类号 TP751.2

UDC 635.317.2

密级 公开

编号 10299020824

硕士学位论文

基于图像处理的自动对焦和自动曝光算法研究

Auto-focus and Auto-exposure Algorithm

Based on Image Processing

指导教师 李正明 教授

作者姓名 徐培凤

申请学位级别 硕士 学科(专业)控制理论与控制工程

论文提交日期 2005 年 4 月 论文答辩日期 2005 年 6 月

学位授予单位和日期 江苏大学 2005 年 6 月

答辩委员会主席

评阅人

摘 要

数码相机中，对焦和曝光是确定最终图像质量的两个重要参数。自动对焦和自动曝光是数码相机软件组成的两个关键技术。

本文在分析数码相机成像理论之后，针对传统自动对焦方法电路及运动机构复杂且调焦不够智能化的缺点，提出了一种新的基于图像处理的自动对焦算法，即 IFDA 算法。该算法通过处理可变数量的离焦图像恢复重建清晰图像，并将对焦评价函数作为判断图像是否清晰的依据。同时比较了三种最优化方法优化恢复图像的效果，并在此基础上确定了最适合使用的方法。

本文还将 BP 神经网络应用于自动曝光的图像处理技术中，提出了一种新的基于图像处理的自动曝光控制算法。该算法首先将图像分块，将每块子图像的亮度信息作为 BP 神经网络的输入求出图像的合适曝光量，根据该曝光量确定快门速度和光圈系数，从而有效控制数码相机的曝光。

使用计算机仿真本文所提出的自动对焦和自动曝光算法，结果表明两个算法均能够得到满意的结果。

本文的主要特色在于通过软件实现算法，而不再需要额外的设备。

关键词：IFDA， 对焦图像面 FIS， 对焦图像， 自动对焦， 自动曝光，
BP 神经网络

ABSTRACT

In Digital Still Camera, focus and exposure are two important parameters that will determine the quality of the final picture. Auto-focus and auto-exposure are two key techniques.

In traditional auto-focus algorithms, the circuit and move institutions are complex. Besides, the focusing is not intelligent. Therefore, in this dissertation after analyzing the image formation theory, we investigate a new algorithm based on the image processing technique, namely IFDA algorithm. By processing variable number of input blurred images, we can recover the sharp image. In IFDA algorithm, we think of the evaluate function as the criterion which judge whether the image is sharp or not. In this dissertation, we also compare the effect of three different optimization techniques that optimize the recovery image, and confirm the best one.

Applying the BP neural network into the image processing technology, Auto Exposure algorithm is investigated. First we segment the image into five parts, and then the histogram of each part will give the brightness. Let the brightness information of each part be the input nerve cell of the BP neural network, we can get the suitable exposure value of the image. According to the exposure value, we can control the exposure of the Digital Still Camera availability.

Simulink the Auto-focus and the Auto-exposure algorithm, the results show that the two algorithms are satisfactory.

The main feature of this dissertation is that the realization of the two algorithms needs no additional device but image process technology.

KEY WORDS: IFDA, Focused Image Surface, Focus Image, Auto Focus, Auto Exposure, BP Neural Network

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏大学可以将本学位论文的全部内容或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密 ☐， 在 年解密后适用本授权书。
本学位论文属于
不保密 ☒。

学位论文作者签名：徐培凤

导师签名：李心明

签字日期：2005 年 6 月 15 日

签字日期：2005 年 6 月 15 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：江苏大学电气信息工程学院

电话：

通讯地址：

邮编：212013

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容以外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：徐磊

日期：2005 年 6 月 15 日

第一章 概述

数码相机是一种将光学、机械学和电子学集于一体的现代高新技术产品，集成了图像信息的处理，存储和传输等各种设备。图 1-1 给出了相机的基本组成。可以看出，数码相机除光学镜头以外，还有图像传感器、A/D 转换、数字信号处理器(DSP)、编码压缩器、存储器、LCD 显示屏(液晶取景器)、连接端口、电源以及附带的驱动软件等重要元器件^[1]。

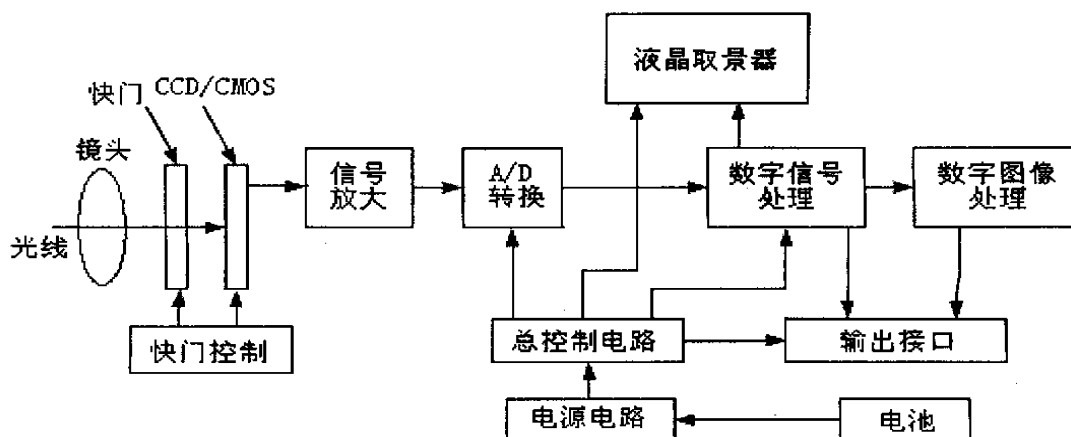


图 1-1 数码相机的基本组成

图 1-2 给出了数码相机完整的成像过程。

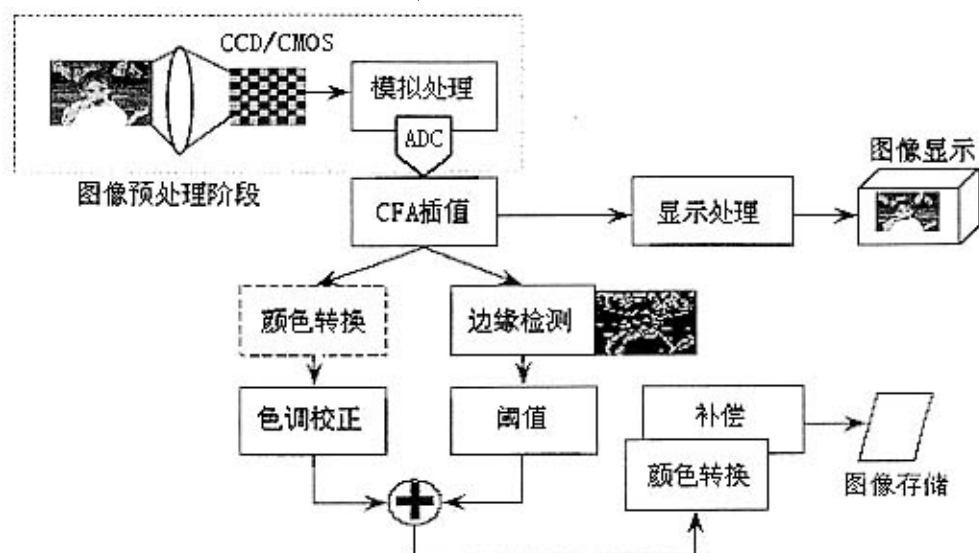


图 1-2 数码相机完整的成像过程

图 1-3 给出了典型的 CCD 传感器在照片拍摄前的图像预处理的情况。

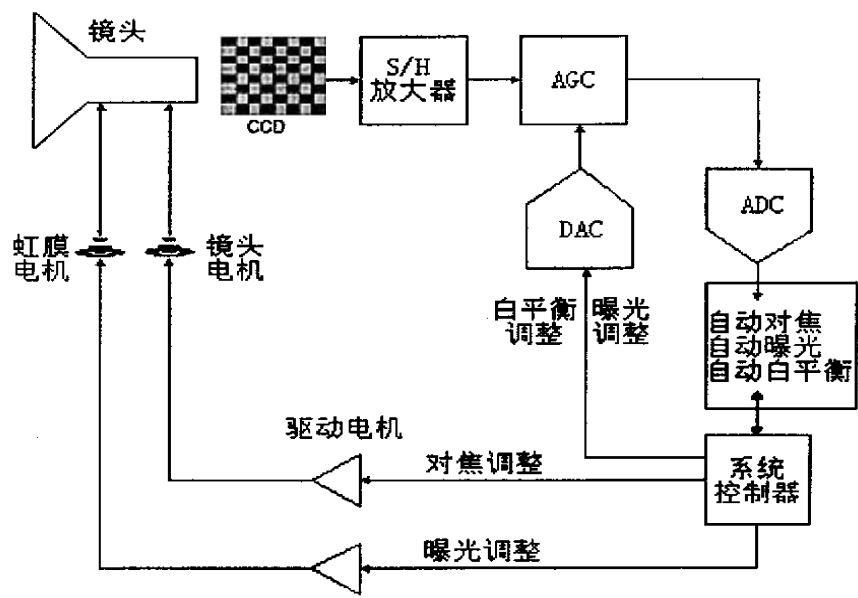


图 1-3 图像预处理情况

数码相机拍摄出实际照片之前，DSP 不断读图像传感器，分析其输出，以确定出决定最终照片质量的三个参数，即白平衡、对焦和曝光。

白平衡：把各种不同光源色温下的被摄景物的颜色，拍摄还原成标准色温下的颜色。调整白平衡，是保证准确还原被摄物真实颜色的需要。

对焦：对焦的目的是使被摄景物在感光芯片平面上结成清晰的影像，保证所摄画面上主体影像的清晰。

曝光：在拍摄过程中使数码相机中的感光芯片得到合适的曝光。
本论文研究的是数码相机的自动对焦和自动曝光问题，这里我们就不介绍关于白平衡的相关情况。

对焦的准确与否，决定了所拍摄照片的清晰度；曝光的正确与否，决定了照片的色还原与层次。其他的辅助自动化功能再多，没有 AF 和 AE 的良好性能是没有用的^[2]。因此研究数码相机的自动对焦、自动曝光技术对于拍摄出清晰的、层次分明的照片有着很重要的意义。

1.1 自动对焦概况

数码相机所采用的对焦方式既可以采用自动对焦也可以采用手动对焦。
手动对焦是用手转动镜头上的对焦环来进行对焦。手动对焦时通常是在取景

器内目测拍摄对焦的清晰程度来判断对焦准确与否的。手动对焦可以保证对焦清晰，但是需要花费较长的时间^[3]。

根据基本原理的不同，自动对焦可以分成两种^[3]：(1)基于测量镜头与被摄景物之间距离的测距方法，简称测距法；(2)基于对焦屏上成清晰像的对焦检测方法，简称检焦法。

测距法就是通过距离感应装置测距，并通过专用芯片的运算、处理，来控制镜头内的调焦马达使相机镜头组前后移动，从而完成自动准确调焦的一种操作，使被摄目标成像清晰^[4]。

检焦法则是通过在镜头附近设置调焦机构，直接探测镜头的焦点^[5]。

除此之外，随着超大规模集成电路 VLSI 的发展以及计算机性能的不断提高，视频图像处理的速度也越来越快，这些都使得半数字式、全数字式自动对焦系统在近年来得到很大的发展和应用。

半数字式自动对焦是通过处理获得的视频图像来得到相应的对焦评价函数，再根据该评价函数驱动电机运动，带动镜头移动，从而获得对焦清晰的图像。理想的评价函数应该具有单峰性、无偏性，并且能反映离焦的极性，能抵抗图像中含有的各类噪声，对各种结构特点的图像都能对焦；同时还要有容易计算、运算速度快等特点^[6]。

全数字式自动对焦则既不需要投射设备，也不需要驱动镜头移动的电机，只需要确定图像的点扩散函数 PSF，根据所得到的 PSF 恢复重建图像，从而得到清晰的对焦图像。

目前许多全数字式自动对焦系统已经内置于数字成像产品中，就其实现方法来说主要包括对焦深度法(IFA)、离焦深度法(IDA)等等。

IFA 法具有较好的对焦精度，已经被许多数字成像产品所采用。它是一种建立在搜寻过程上的对焦方式。它利用调焦机构不断改变光学系统的相关参数，同时获取这些参数下的一系列图像，从中找出最清晰的一帧，根据这帧图像的成像参数即可获得最佳对焦效果的图像。IFA 主要需解决图像清晰度的评价以及基于图像清晰度的焦平面定位等问题，以保证对焦系统能根据需要快速准确地定位出最佳成像焦平面位置。

IDA 法则不属于搜寻方法。它是根据物体的离焦程度以及相应的成像参数来

确定物距和对焦图像,而不再需要物体对焦,并且 IDA 只需要处理少数几帧图像就能够达到目的。它比 IFA 计算速度快,但是精度不及 IFA。另外它还需要精确的相机特性参数。

1.2 自动曝光概况

数码相机所采用的曝光方式既可以采用测光手动曝光也可以采用自动曝光。

测光手动曝光就是由拍摄者自己选择光圈系数、快门速度,使用数码相机的测光系统判断曝光是否合适的曝光方式。

自动曝光则是由数码相机根据自身测光系统的测光结果,自动选定光圈系数、快门速度(或者人为选择一项,相机自动选择另一项)来获得准确曝光的曝光方式。自动曝光可以分为光圈先决式自动曝光、快门先决式自动曝光、程序式自动曝光等形式^[1]。

光圈先决式自动曝光就是人为选定光圈系数,相机自动选择快门速度。

快门先决式自动曝光则是人为选定快门速度,相机自动选择光圈系数。

程序式自动曝光是指光圈系数和快门速度均由相机内置的程序自动调节。它的优点是不需要拍摄者设定光圈系数和快门速度。

传统的自动曝光控制方法中,有的采用特定的微处理器硬件电路控制曝光^[7];有的采用图像的整体亮度来控制曝光,但是如果拍摄主体与拍摄背景之间的亮度差太大,会使得拍摄主体出现曝光不足或者曝光过度的现象^[8];有的采用参照亮度值,将图像分块,每一块子图像的亮度被用于设置参照亮度值,该参照亮度值可以通过调整光圈大小获得^[9],当然同样也可以通过设置快门速度获得该参照亮度值^[10];还有的则通过研究不同光照条件下的亮度与曝光值之间的关系来进行曝光控制^{[11][12][13]}。

1.3 论文主要内容

随着通用 DSP 计算性能的提高,数字成像产品的开发将逐步向采用通用 DSP 取代专用 IC 的方向发展,纯软件的自动对焦、自动曝光系统将成为开发数字成像产品的发展方向。

虽然 IFA 法对焦精度较高,但是却需要耗费较长的时间; IDA 法则对焦速度快,但是对焦精度却不高。可以综合考虑 IFA 法和 IDA 法,取它们的优点设

计出一种新的算法来实现数码相机的自动对焦功能。

传统的自动曝光控制方法中，有的曝光控制方法使得曝光不足或者曝光过度，有的曝光控制方法虽然准确但是却需要大容量的图像数据库。针对传统的自动曝光控制方法所存在的问题，本文提出了一种新的基于图像处理的自动曝光算法实现了数码相机的准确曝光且无需建立大容量的图像数据库。

本文主要内容及成果：

1. 在研究了 IFA 和 IDA 根据模糊图像恢复重建清晰图像的基础上，综合两者之优点提出了一种新的根据可变数量的模糊图像恢复重建清晰图像的自动对焦算法，即 IFDA 算法。

2. 分别给出了三种最优化方法的使用情况，将它们进行比较，最终确定了最适合用于优化 IFDA 算法结果的方法。

3. 将 BP 神经网络^{[14][15]}应用于自动曝光的图像处理技术中，提出了一种新的基于图像处理的自动曝光控制算法。

4. 将所研究的纯软件自动对焦、自动曝光算法在镇江江奎集团所生产的数码相机 DC-3300Z 中进行了试验，并得到了满意的结果。

第二章 数码相机的硬件系统

数码相机的硬件系统主要由数字信号处理器 DSP、镜头、图像传感器(感光芯片)、对焦系统、光圈、快门取景机构以及存储器件等部分组成。本文自动对焦、自动曝光算法研究是在镇江江奎集团生产的数码相机 DC-3300Z 的硬件环境下进行的。本章简要介绍 DC-3300Z 的硬件构成,如图 2-1 所示。

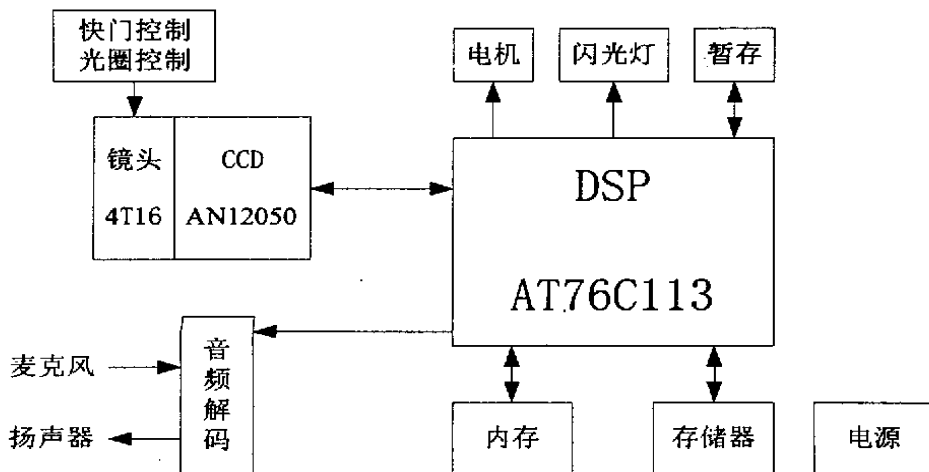


图 2-1 DC-3300Z 结构框图

2.1 数字信号处理器 DSP

数字信号处理器 DSP 在整个数码相机系统中处于核心地位。镇江江奎集团生产的数码相机 DC-3300Z 采用的数字信号处理器 DSP 是 ATMEL 公司生产的数码相机专用芯片 AT76C113。图 2-2 给出了 DC-3300Z 使用该芯片的情况^[16]。图 2-3 给出了 AT76C113 的顶层结构框图。

第二章 数码相机的硬件系统

数码相机的硬件系统主要由数字信号处理器 DSP、镜头、图像传感器(感光芯片)、对焦系统、光圈、快门取景机构以及存储器件等部分组成。本文自动对焦、自动曝光算法研究是在镇江江奎集团生产的数码相机 DC-3300Z 的硬件环境下进行的。本章简要介绍 DC-3300Z 的硬件构成,如图 2-1 所示。

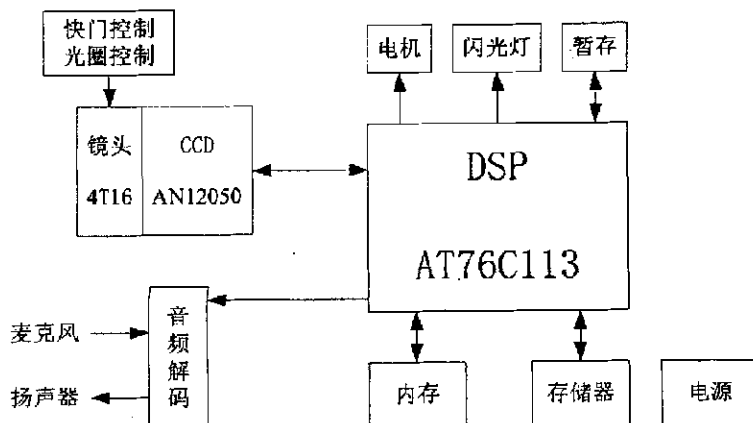


图 2-1 DC-3300Z 结构框图

2.1 数字信号处理器 DSP

数字信号处理器 DSP 在整个数码相机系统中处于核心地位。镇江江奎集团生产的数码相机 DC-3300Z 采用的数字信号处理器 DSP 是 ATMEL 公司生产的数码相机专用芯片 AT76C113。图 2-2 给出了 DC-3300Z 使用该芯片的情况^[16]。图 2-3 给出了 AT76C113 的顶层结构框图。

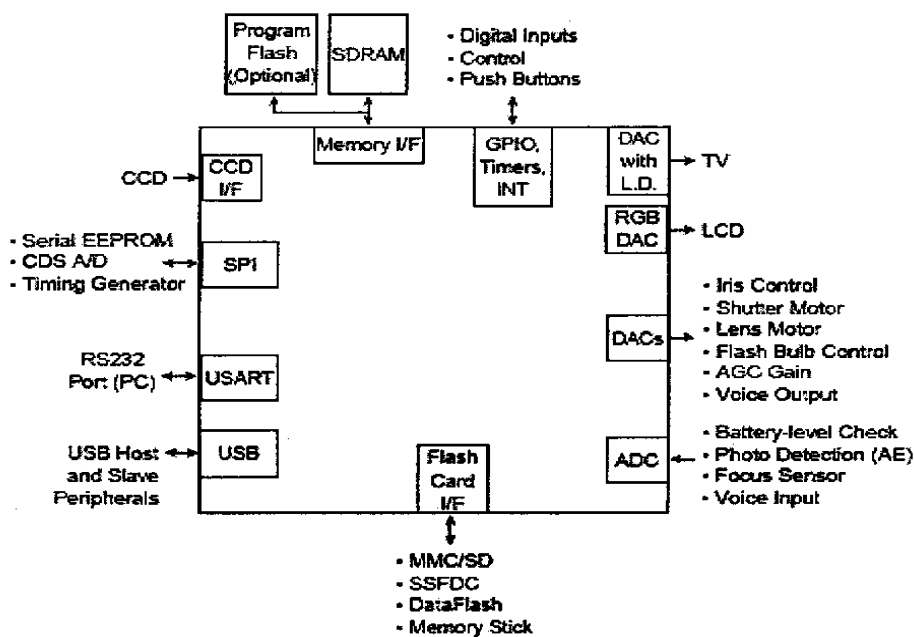


图 2-2 DC-3300Z 应用 AT76C113

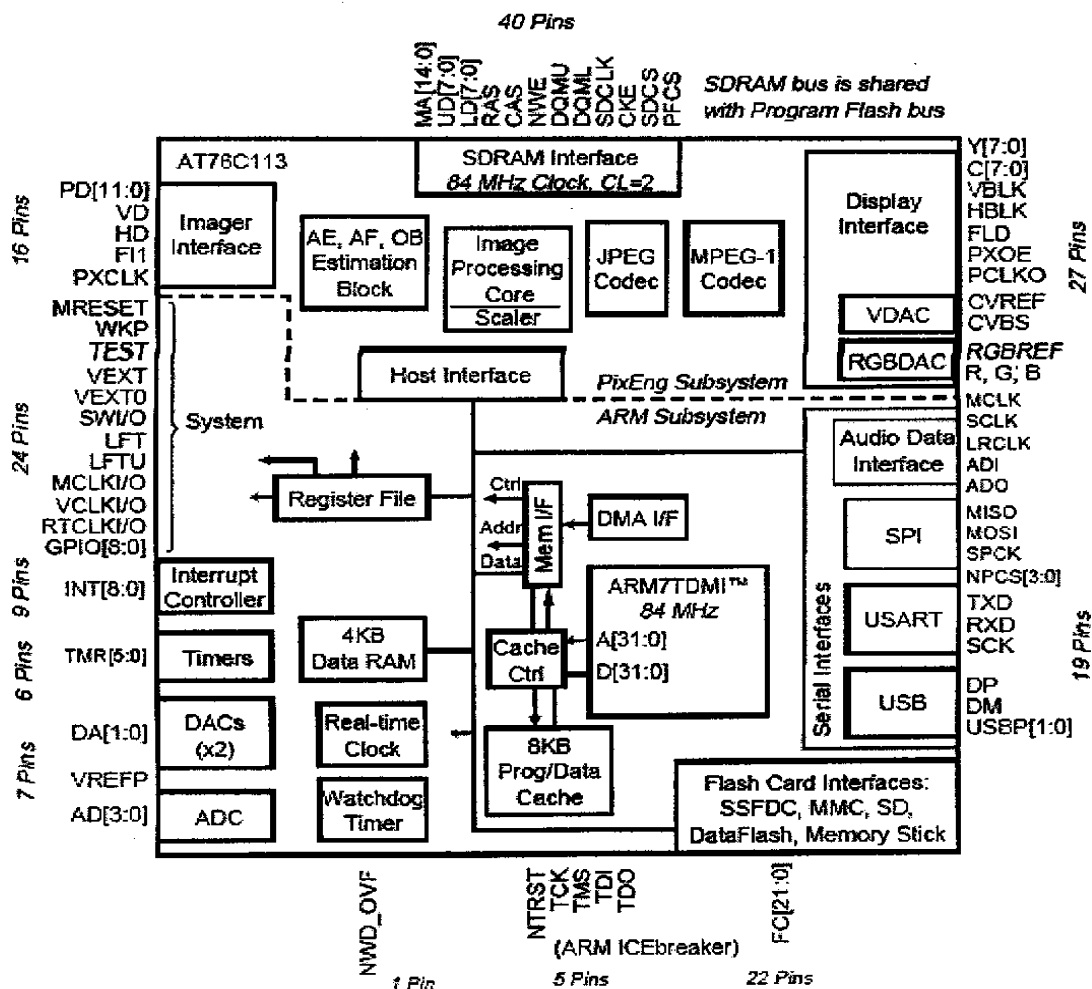


图 2-3 AT76C113 的顶层结构框图

由图 2-3 我们可以看出, AT76C113 有 16 个引脚用于图像接口, 即 PD[11:0]、VD、HD、FI1 以及 PXCLK。其中 PD[11:2] 用来存储图像像素数据, VD 为垂直同步信号, HD 则为水平同步信号, FI1 是域鉴定信号。

2.2 摄像系统

数码相机的摄像系统由光学镜头和图像传感器共同组成。数码相机中的摄像系统起着成像作用, 也就是将拍摄的景物通过它成像在感光平面上。数码相机的感光平面就是 CCD 或 CMOS 感光芯片表面位置。摄像系统是整个数码相机系统的输入设备, 它将光学模拟信号转换成电信号, 输出视频信号。

DC-3300Z 采用的镜头是 RICOH 公司的 4T16^[17], CCD 图像传感器采用的则是松下 AN12050^[18], 同时使用松下 MN3114^[19] 芯片驱动 CCD 图像传感器。图 2-4 给出了镜头的构造框图; 图 2-5 给出了镜头内部电气框图以及它与 CCD 之间的连接关系; 图 2-6 给出了 CCD 图像传感器 AN12050 的应用情况; 图 2-7 则给出了 MN3114 驱动 CCD AN12050 的情况。

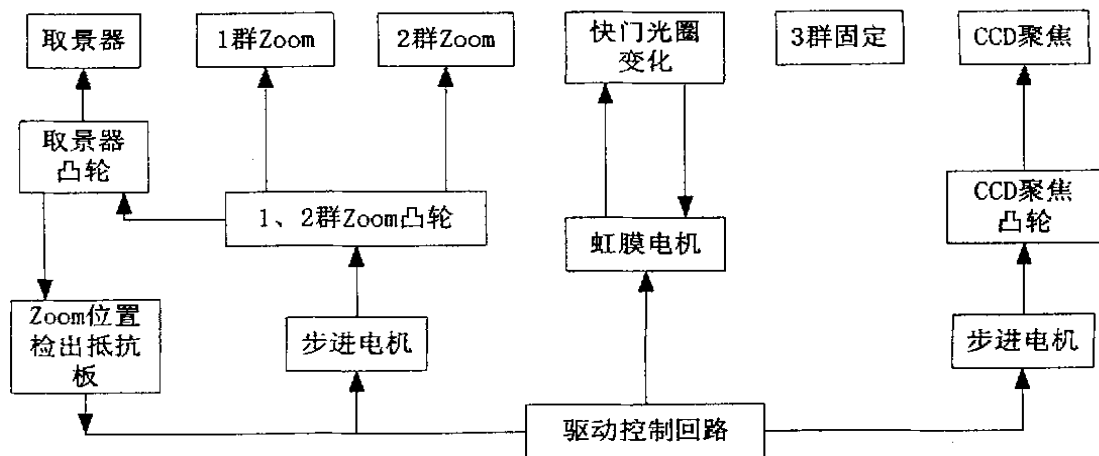


图 2-4 镜头构造框图

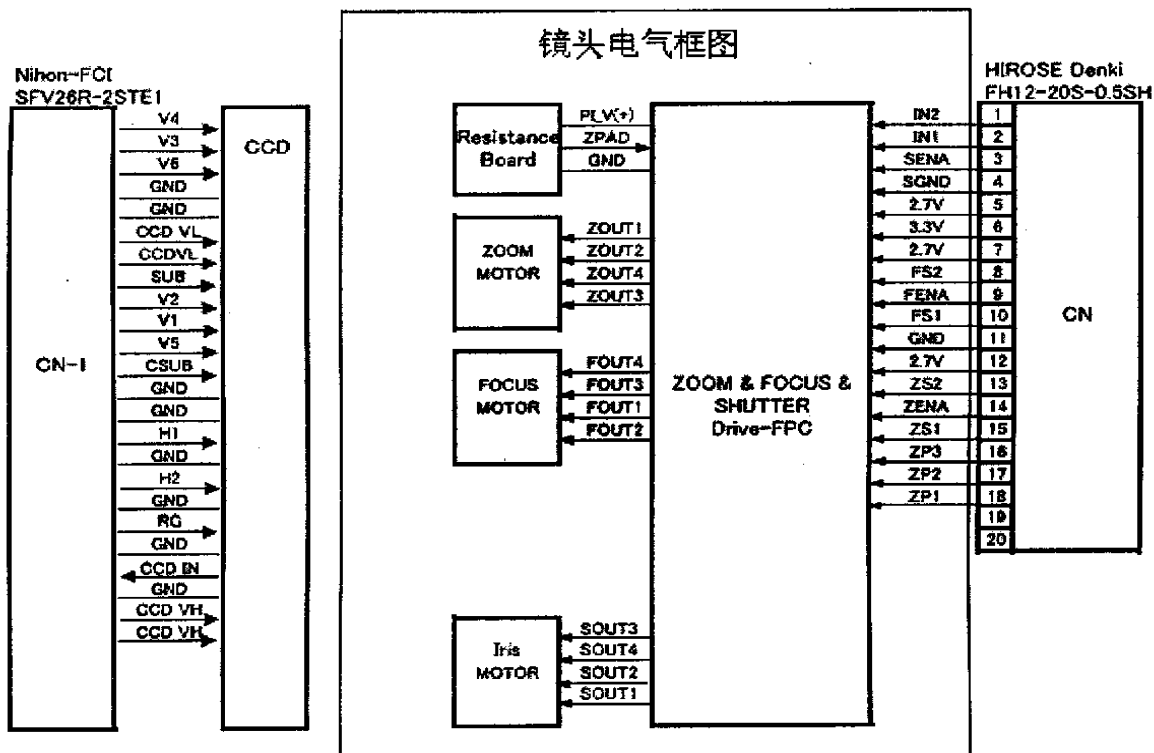


图 2-5 镜头内部电气框图、镜头与 CCD 之间的连接关系

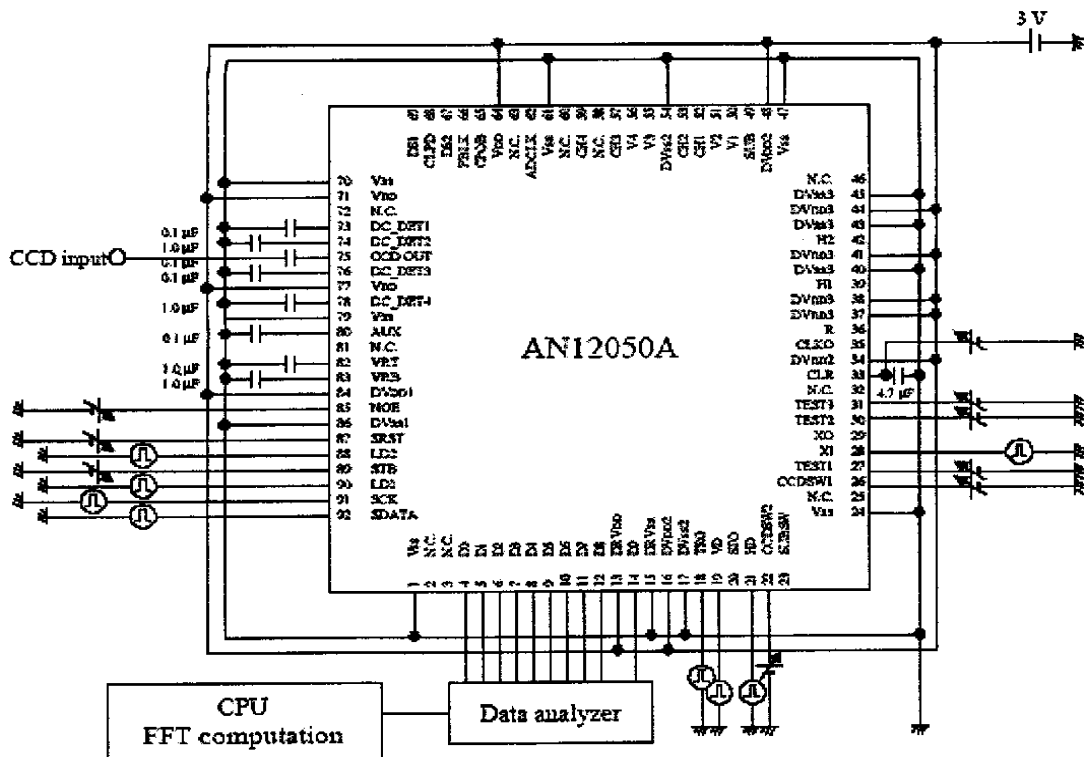


图 2-6 CCD 图像传感器 AN12050 的应用情况

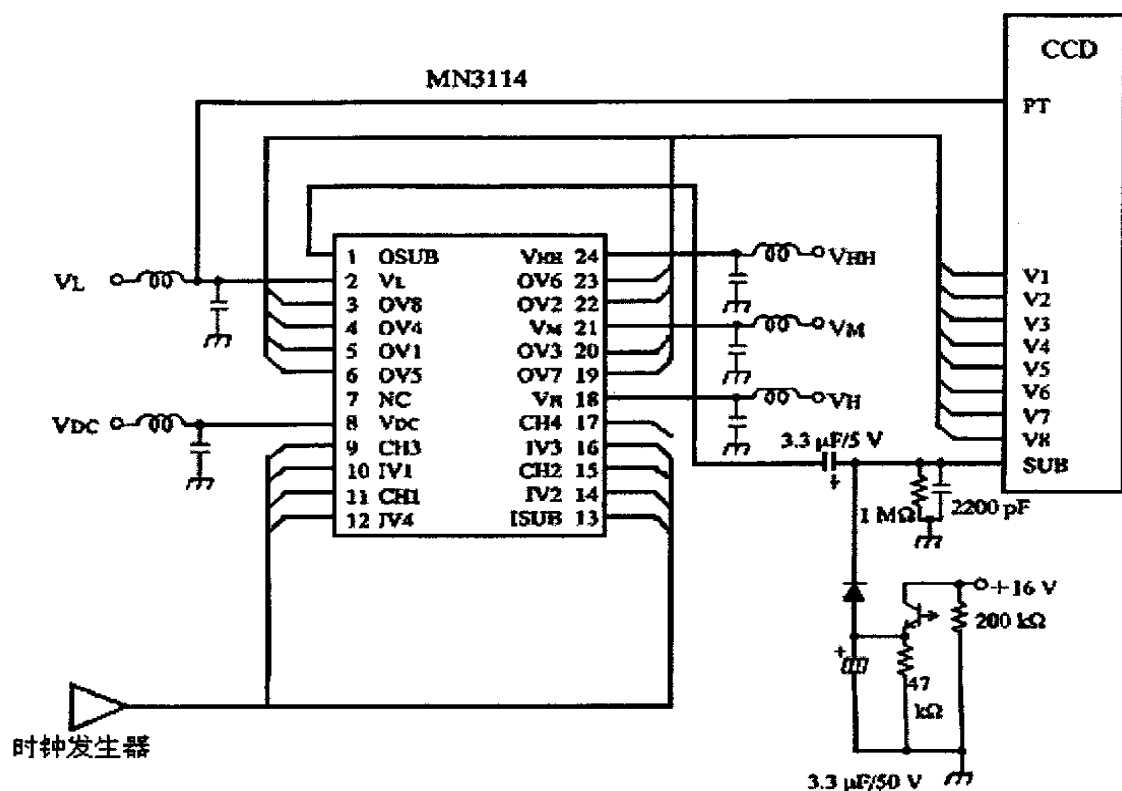


图 2-7 CCD 驱动电路

图 2-8 总结了数码相机中图像数据的流向。

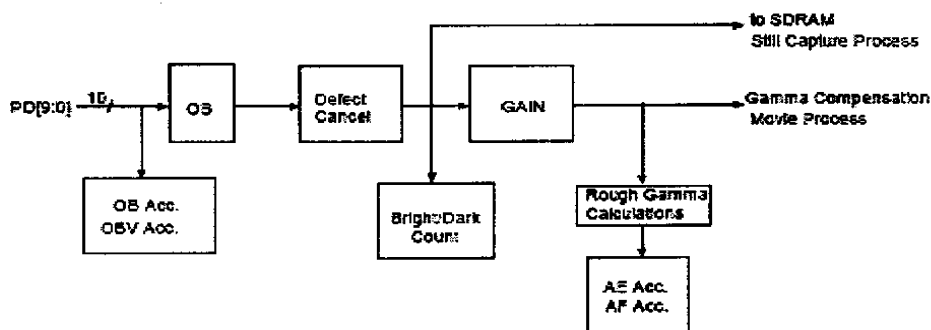


图 2-8 图像预测处理

2.3 对焦系统

对焦系统的作用是改变拍摄时镜头镜片与感光芯片之间的距离，使被摄景物在感光芯片平面上形成清晰的像，即保证所拍摄的影像是清晰的。与传统相机一样，数码相机的对焦方式有手动对焦、自动对焦和免对焦之分。本文数码相机系

统采用全数字式自动对焦，我们将在下面的章节中详细介绍该自动对焦方式。

2.4 曝光系统

数码相机曝光量的多少由数码相机的光圈大小和快门速度共同决定。

光圈是利用其进光孔控制曝光时到达数码相机感光芯片上的光线照度强弱的装置，它位于数码相机镜头内部。镜头里的光圈除了控制进光照度进而控制进光量之外，还可以控制成像质量和所拍摄影像的景深。

快门是利用其开启时间的长短控制进光时间，进而控制进光量(曝光量)，因而进光量为进光时间与光线照度的乘积。

数码相机除了上面所介绍的硬件组成部分之外，还有取景机构、存储器件等组成部分，由于它们对自动对焦和自动曝光的控制没有影响，所以本文就不再详细介绍。

第三章 对焦离焦深度法 IFDA

摄影摄像技术中,对焦是保证感光器件记录的影像取得清晰效果的关键技术。调焦机构调节摄像镜头和感光器件之间的距离,使得像平面就是感光器件的表面。自动对焦,就是根据被摄目标的距离,由调焦机构指使镜头前后移动到相应的位置上,从而使被摄目标自动清晰成像。在讨论数码相机的自动对焦问题之前,很有必要给出光学成像系统模型。图 3-1 给出了典型的建立在近轴几何光学基础上的光学成像系统模型^{[20][21]}。

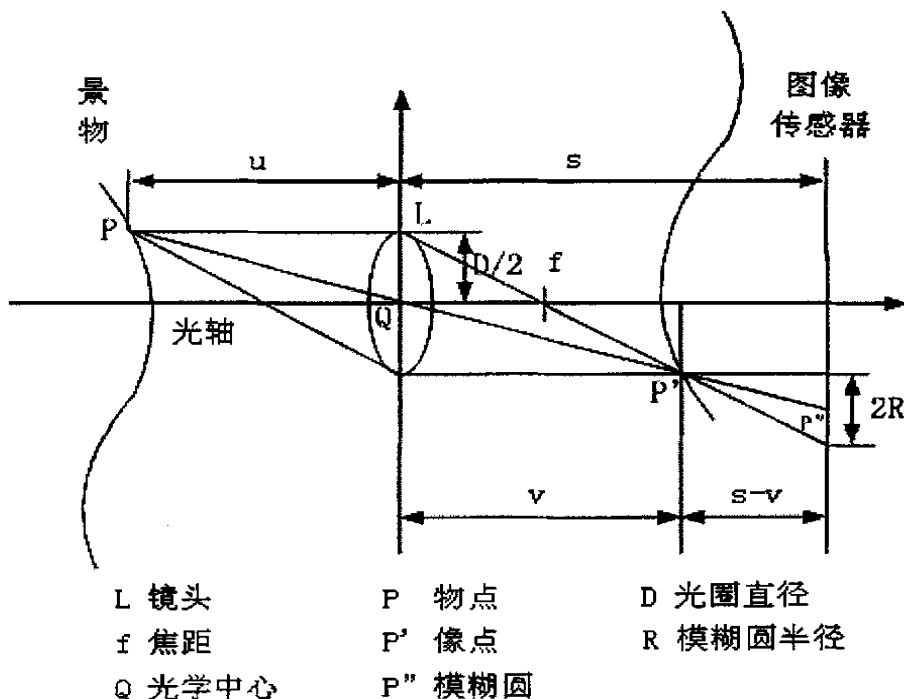


图 3-1 光学成像系统的模型

P 是被摄物上一点, P' 是 P 所成的像。成像时不会产生像差的镜头具有两个特性: (1) 物点 P 的能量与其像点 P' 的能量成一定的比例关系, 增加点光源的强度会使得像斑的强度按照一定的比例增加, 因而可以认为透镜是一个二维线性系统; (2) 物点 P 与其像点 P' 的位置关系可以表示为等式(3-1)。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (3-1)$$

f 为镜头焦距, u 、 v 分别为物距和像距。图中 s 、 f 、 D 统称为成像参数, 用向量

e 表示:

$$e=(s, f, D) \quad (3-2)$$

如果相机系统不能准确对焦, 则物点 P 所成的像就是一个光斑 P'' , 其形状与相机系统的光圈相同; 如果物点 P 对焦准确, 则成像光斑的尺寸最小。如果相机光圈为圆形, 点光源不能准确对焦时, 在图像传感器上会形成一个半径为 R 的模糊圆 P'' , 且圆内亮度均匀而圆外亮度为零^{[22][23]}。 R 可以表示为:

$$R = \frac{D}{2} s \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s} \right) \quad (3-3)$$

对于离散图像, 其模糊半径为 $\sigma = cR$ (σ 以像素点为单位), $c > 0$, 为相机常数, 在相机校准过程中确定。在不同的透镜位置, 有:

$$\sigma_m = cR_m s_m \left(\frac{1}{f_m} - \frac{1}{s_m} - \frac{1}{D} \right) \quad m=1, 2 \quad (3-4)$$

当物距改变时, 焦距不变, 则获得清晰像的位置随之改变, 即 s 改变。此时有两种调整方法: (1) 改变镜头位置达到清晰成像的目的, 但这样会引起放大倍率的变化; (2) 固定 s , 调整物面沿光轴的位置, 使其达到设计要求的物距, 这多用于精密仪器。要得到清晰的图像, 就要使 P 和 P'' 完全重合, 使光学成像系统处于对焦状态, 这可以通过手动调焦实现, 也可以采用自动对焦技术实现。

随着各种成像设备自动化、智能化的迅速发展, 自动对焦技术的应用越来越广泛。自动对焦系统一般由两个功能模块构成, 一个分析处理模块, 一个控制驱动模块^[24]。分析处理模块判断输入图像是否对焦清晰, 如果对焦不清晰则该模块同时测算出这幅图像的离焦程度; 控制驱动模块则根据分析处理模块提供的相关信息来调整整个系统的状态, 使目标图像处于对焦状态。根据两个功能模块的实现方法不同, 自动对焦系统可以分成不同的种类, 如表3-1所示。

	分析处理模块	控制驱动模块
焦点检测自动对焦	反差检测或相位差检测	电机驱动镜头移动
测距自动对焦	红外或超声波测距	电机驱动镜头移动
半数字式自动对焦	计算图像的高频分量能量值	电机驱动镜头移动
全数字式自动对焦	计算图像的点扩展函数	根据点扩展函数进行图像恢复

表3-1 根据功能模块的分类

根据基本原理,自动对焦的分类可以用表 3-2 表示:(1)基于镜头与被摄物之间距离测量的测距方法;(2)基于对焦屏上成像清晰的对焦检测方法。

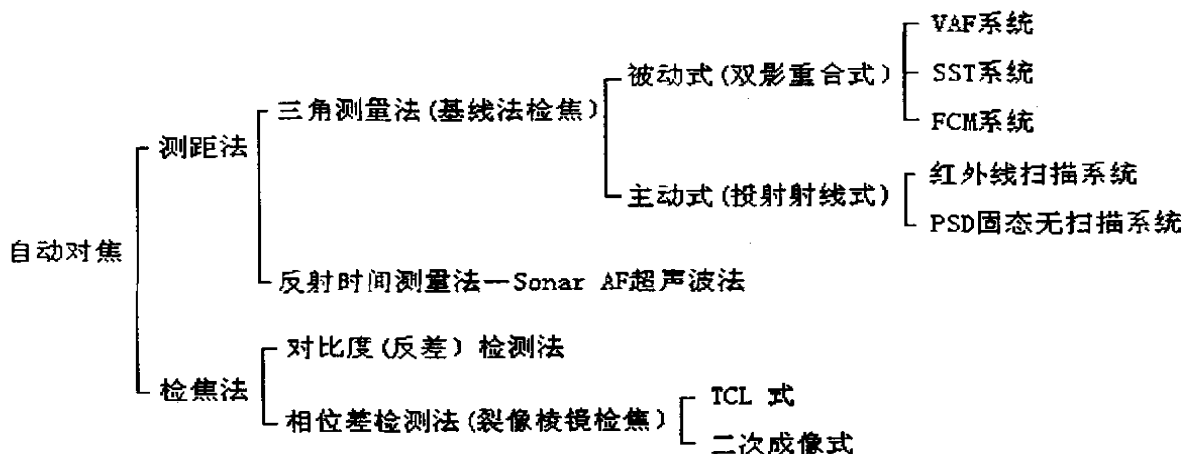


表 3-2 根据基本原理的分类

测距法主要有三角测量法、红外线测距法和超声波测距法。红外线式和超声波式自动对焦是通过发射光波或者声波进行测距,称之为主动式自动对焦。对焦检测法主要有反差(对比度)检测法和相位差检测法。反差检测法通过检测影像的轮廓边缘实现自动对焦;相位差检测法则通过检测像的偏移量实现自动对焦。

3.1 测距法

一般镜头快门相机的取景器中,调焦时可以看到两个不重合的像,一个是直接通过取景系统的基准像,另一个是由测距可动反光镜反射的参照像。可以通过调节镜头、用机械联动使两像重合来达到正确对焦。自动对焦就是采用传感器把测得的两个不重合的信息,通过电路运算,发出镜头移动信号,使两像重合,在两像重合后给出停止信号,从而结束调焦。

双像重合式自动对焦不需要发射系统,耗能少,有利于小型化,但是对细线条的物体、低反差的物体、运动物体以及暗的物体等等对焦比较困难。因此,目前镜头快门照相机的自动对焦技术都向主动式方法转换,红外测距和超声波测距自动对焦都属于主动式自动对焦^{[25][26]}。

红外测距法或超声波测距法广泛应用于镜头快门照相机,属于主动式测距方法。双像重合式则属于被动式测距方法。

3.1.1 主动式 (投射射线式)

红外测距自动对焦采用被摄物反射的红外线进行测距,它由相机内的红外发光元件发射红外线,从被摄物反射回来,由装置在相机内的测光元件接收进行测距。图3-2给出了一种典型的红外测距法^{[27][28]}。

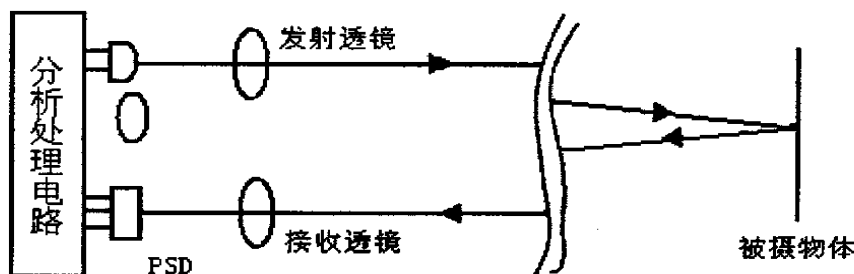


图3-2 LED-SPD自动对焦系统原理图

红外线发光二极管LED发射一束红外光束,经发射透镜会聚后射到被摄物体表面,经被摄物反射后,一部分光线经接收透镜会聚于位置传感器PSD表面,形成一个光斑。由几何关系可知,当发射、接收系统的相对位置固定后,PSD上光斑的位置仅与被摄物与相机间的距离有关,PSD的输出信号又正好反映其表面光斑的位置,经分析处理电路处理后,被摄物离相机的距离就被测出。

实际应用中,分析处理电路比较复杂,包括增强抗干扰能力的调制解调电路、PSD信号的除法运算以及放大处理电路等。在光学系统方面,为了使PSD接收的光斑能量尽可能大,以便分析处理电路获得较高的信噪比,发射透镜和接收透镜的口径都要尽可能大。另一方面,为了使PSD对光斑位置有较高的检出灵敏度,PSD上的光斑要尽可能小,且边缘清晰,这就要求发射、接收透镜的像差要尽可能小。

超声波测距自动对焦则是由相机发出超声波信号,测出该信号从被摄物反射回接收器所花费的时间,据此计算出物体的距离,调节镜头至相应的对焦位置。当接收器接收到反射声频后,通过运算电路得到物体的距离,并据此调节电机运动,驱动镜头进行调焦。

PSD: Position Sensitive Detector, 固态无扫描方法。PSD系统中IRED和PSD都是静止的,没有扫描运动。PSD不仅结构简单、而且光电输出特性线性好、分辨率高(可达几个 μm)、响应快,甚至可以在受光面上获得无级连续的位置检测。

PSD还可制成多维的、以完成同时量测几个位置或位移的任务^[28]。

测距法里还有一种反射时间测量法，这种方法使用Sonar而不用电磁波，因为电磁波的速度太快，测近距时，往返的时间太短，一般测量很难保证精度。

3.1.2 被动式 (双影重合式)

被动式测距法耗能少、结构简单，但在低亮度、弱反差情况下对焦能力和对焦精度大为下降，对于黑色被摄主体或镜面对焦就更为困难。这种技术目前已经由主动式、尤其是PSD系统替代。被动式测距法主要包括VAF系统、SST系统以及PCM系统。

VAF: Visitronic AF, 是双像对称式光电自动对焦系统的简称。这种无源被动测量法，是通过 VAF 系统接收固定反射镜和旋转反射镜反射的被摄主体影像实现自动对焦的。

SST: Solid State Triangulation, 也属无源被动的三角测量法，但比 VAF 法大有改进。它采用两块固定的反光镜，而不是一块旋转、一块固定；有活动部分。没有了机械扫描，就简化了机构、缩小了体积、减少了噪音，提高了精度。

FCM: Focusing Central Memory, 对焦中央存储器法。它只用一个传感器，把来自半反射镜、射到受光元件上的像存储起来，然后半按 AF 快门，让可动反光镜由近而远扫描，并将像不断与已存储的像比较，当两者重合时，可动反光镜所对应的镜头距离即为所求。

3.2 焦点检测自动对焦 (检焦法)

焦点检测法主要用于单反相机中。它是在镜头的焦点附近设置自动对焦微型组件，将镜头焦点直接作为探测对象的一种方式^[5]，它能够适应各种变焦镜头且拍摄距离大。它分为反差检测和相位差检测两种。

3.2.1 反差检测法

反差就是光学上的视觉清晰度，即边缘对比度。观察景物轮廓时，像亮度变化越大，其亮度梯度越大，轮廓也就越清晰。观察取景器上图像时，如果使得清晰的图像离焦，则其亮度梯度减小，图像也变得模糊。反差检测对焦装置中，将非线性光敏元件置于图像传感器面的等价位置前后进行对比度检测。再经运算电

路进行自动对焦控制或作调焦方向指示。反差检测法只能是被动式，它与取景器视差无关，能够找准被摄物；在对焦屏上可以监视对焦情况，可以保障一定的精度；焦点检测器件固定在一个盒子里，可以提高可靠性和稳定性。但是当被摄物反差较低或被摄物所处环境较暗时，这种方法对焦困难^[29]。

3.2.2 相位差检测法

相位差检测法是根据基准光线和参考光线随被摄物距离不同而产生不同的位置差，将该位置差换算成相位差，将它与不产生相位差时比较，再根据调焦组件的运算，得到镜头的移动量和方向，然后由伺服电机带动镜头运动。相位差为零，发出停止信号，镜头停在对焦位置。

就其本质而言，测距法、检焦法都是模拟人的对焦行为，只是由光电测距器件(传感器)、微处理器(调节器)和微电机(执行机构)构成实时自动对焦系统。自动对焦只是使用传感器替代人眼目测距离；微处理器替代人的用脑判断；微电机替代人手的对焦。

3.3 半数字式自动对焦

近年来，随着超大规模集成电路 VLSI 的发展以及计算机性能的不提高，视频图像处理的速度也越来越快，半数字式自动对焦系统在数字成像领域内得到了很大的发展和应用。

半数字式自动对焦由分析处理模块直接处理视频图像，以得到相应的对焦评价函数；控制驱动模块则根据得到的对焦评价函数驱动电机运动，带动镜头前后移动，直到获得对焦清晰的图像。因此，构造合理的评价函数是半数字式自动对焦系统的关键。

理想的评价函数应该具有单峰性(仅一个极值)、无偏性(只在最佳对焦时具有最大值)、能反映离焦的极性(位于焦前还是焦后)、同时应该具备较好的抗干扰能力。根据不同的对焦评价函数，半数字式自动对焦可以分为以下几种：

3.3.1 阈值积分法

阈值积分法是在图像离焦情况下，判断图像的模糊程度^{[30][31][32]}。阈值积分

法对被测对象的性质比较敏感,对尺寸较小的目标图像适应性较好,对大范围的目标图像则效果不佳。

3.3.2 频域带通法

频域带通法是基于图像频率的检测方法,图像轮廓的锐度和细节的丰富度取决于图像的高频部分。离焦退化造成的图像模糊在频域上表现为高频成份的衰减,因此适当选择带通滤波器的带通,使其恰好通过视频信号中对离焦敏感的那部分频率成份,就能实现图像清晰度的自动检测^{[33][34]}。

频率带通法的检测特性比较稳定,对不同尺寸的目标图像都能较好的进行对焦,但其运算量也相应增加。

3.3.3 微分梯度法

对图像进行微分运算可以提取图像中景物的边缘和轮廓,对于数字图像,微分运算近似用差分代替。微分法是选定图像灰度差分绝对值之和作为对焦评价函数^[35]。用于对焦评价函数的常用梯度算子主要有 Roberts 算子、Sobel 算子^[36]等。

微分法在调焦效果上比频域带通法好,在近焦区的检测灵敏度较高,远焦区有效范围较宽,但是对噪声较敏感,抗干扰性较差。

3.3.4 图像最大熵法

根据 Shannon 信息论,熵最大时表示的信息量最多^[37]。图像最大熵法对生物医学显微成像非常适用,用于摄像机自动对焦则效果一般。

获取对焦评价函数的方式多种多样,既可以采用硬件电路处理视频图像,将整个系统作为一个嵌入式系统^{[38][39]}。也可以先通过计算机采集视频图像,然后再利用相应的软件处理这些图像^{[31][32][40][41][42]}。目前这两种实现方法都有,各有其优缺点。

半数字式自动对焦系统也有相应的缺点:控制驱动模块需要寻找最佳对焦位置,使得系统的输出图像相应的不断变化,导致输出图像不稳定且有一定的时延。

3.4 全数字式的纯软件自动对焦

随着通用数字信号处理器 DSP 计算性能的提高,数字成像产品的开发将逐步

向采用通用 DSP 取代专用 IC 的方向发展,全数字式的纯软件自动对焦、自动曝光系统将成为开发数字成像产品的发展方向。本文我们提出的 IFDA 算法正是一种全数字式的自动对焦算法,它通过处理以不同成像参数拍摄的数量可变的序列模糊图像重建恢复清晰的图像。

根据表3-1, 可以看出全数字式自动对焦系统既不需要红外光源或超声波,也不需要驱动镜头移动的电机,最大限度的节省了体积和费用。全数字式自动对焦具有两大优点:第一,调焦更加智能化,对焦判据更加灵活多样。基于模拟图像的对焦检测方法只利用被测物和背景之间的对比度(轮廓边缘的梯度)作为判断是否清晰成像的判据。而通过数字图像处理,不仅可以利用梯度信息,还可以提取图像中其它各种有效信息进行判断,例如频率、相位等。对于具有高频信息的图像,一般而言,对焦越准确,图像信号的频率越高,边缘越尖锐;离焦时则频率降低,边缘相对平滑。此外,由于计算机处理图像的灵活性,可以针对不同的使用要求,选择不同的判据进行调焦。第二,利用计算机可以很方便地对运动执行机构进行控制,从而避开复杂的调焦电路和机构。计算机接口和总线技术已经非常成熟, 通过软件给出控制信号,直接控制电机驱动物镜的运动,不仅灵活方便,响应速度符合调焦要求,还能大大简化电路和运动机构。

全数字式自动对焦的关键在于确定图像的点扩散函数 PSF。图 3-1 中,如果 P 没有完全对焦,则它在图像传感器上会形成模糊图像 P"。设 P 的入射能量为单位能量 1,则 P"就是系统对单位能量的冲击响应,也就是相机系统的点扩散函数 PSF,记为 $h_a(x, y)$ 。定义 $q=2R/D$, 根据相似三角形定理有:

$$q = \frac{2R}{D} = \frac{s-v}{v} = s\left[\frac{1}{v} - \frac{1}{s}\right] \quad (3-5)$$

由等式(3-1), 有 $\frac{1}{v} = \frac{1}{f} - \frac{1}{u}$, 代入等式(3-5), 得到:

$$q = s\left[\frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s}\right] \quad (3-6)$$

从而, 模糊圆半径 R 为:

$$R = q \frac{D}{2} = s \frac{D}{2} \left[\frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s}\right] \quad (3-7)$$

显然, R 为关于物距 u 和相机参数 e 的函数, 记为 $R(e, u)$ 。因此可以得到系统的

点扩散函数 PSF^[43]:

$$h_1(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2(e, u)} & x^2 + y^2 \leq R^2(e, u) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3-8)$$

其 Fourier 变换形式为:

$$H_a(w, w; e, u) = 2 \frac{J_1(R(e, u)\rho(w, v))}{R(e, u)\rho(w, v)} \quad (3-9)$$

其中, J_1 为一阶 Bessel 函数, $\rho(w, v) = \sqrt{w^2 + v^2}$ 。

实际应用中,除了上面所述的 PSF 确定方法以外,还有其它方法确定系统的 PSF^{[24][44][45]}。首先,将输入图像分割成多个图像块,将它们按照所含线条的边界信息不同分成不同的集合,然后根据每种集合的阶跃响应函数推出整个图像的二维点扩散函数 PSF,最后再根据所得到的 PSF 重建恢复图像,从而得到清晰的对焦图像。图 3-3 给出了这种方法的实现过程。

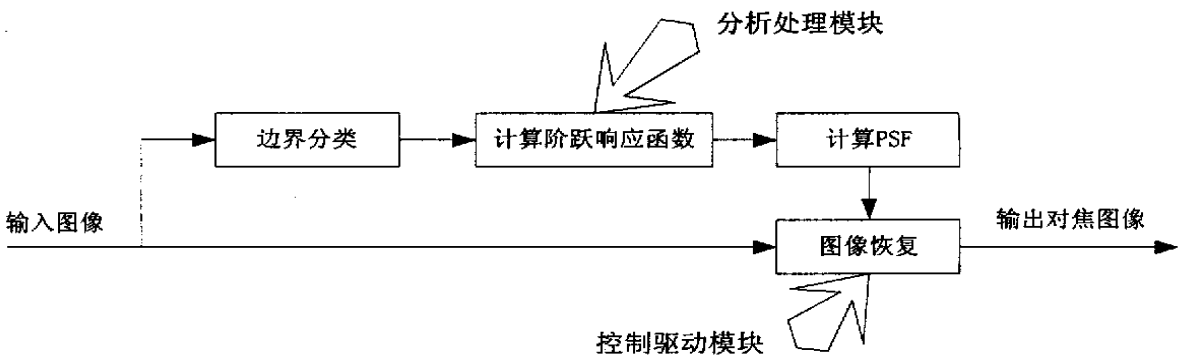


图 3-3 图像恢复实现自动对焦

当然全数字式自动对焦系统不可能是十全十美的,它也有其缺点。由于图像处理需要占用大量的计算机资源,所以全数字式自动对焦系统在计算机硬件方面要求较高。

3.5 对焦离焦深度法 IFDA

研究数码相机的自动对焦技术,必须以一定的成像模型为研究对象。本文我们所研究的基于图像处理的对焦离焦深度法 IFDA 正是建立在研究图 3-1 所示的光学成像模型的基础上。

3.5.1 成像模型

图 3-1 中, 物点 P 在图像传感器上所成像的亮度分布由其位置和成像参数 \mathbf{e} 确定。物点位置用物距 u 和方向 (x, y) 共同表示, 点 (x, y) 为物点与镜头中心所成直线与图像传感器面的交点。位于 $u(x, y)$ 处的单位亮度物点所成的像在图像传感器平面上 (x', y') 处的亮度值用 $h(x, y, x', y', \mathbf{e}, u)$ 表示。如果成像过程中没有能量损失, 则物点在图像传感器面形成的所有像点的亮度和为 1:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y, x', y', \mathbf{e}, u) dx' dy' = 1 \quad (3-10)$$

函数 h 实际上就是相机系统的点扩散函数 PSF。如果三维被摄物为非透明的, 则沿着任意方向 (x, y) 都只有一个可视点, 位于 $u(x, y)$ 处, 且具有 $F(x, y)$ 个单位亮度。则被摄物的可视表面可以看成是由 $u(x, y)$ 定义的点光源的集合, 并且在 (x', y') 处的图像亮度 $g(x', y')$ 为景物中所有点光源在该处所产生的亮度之和:

$$g(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) h(x, y, x', y', \mathbf{e}, u(x, y)) dx dy \quad (3-11)$$

为了便于计算, 设相机 PSF h 为关于标量参数 d' 和 d 的函数, 而不再是关于向量 \mathbf{e} 和 $u(x, y)$ 的函数。设 u' 为参照物距, 则当点光源的物距分别为 u' 和 u 时, 其模糊参数分别为 d' 与 d 。定义 d 为点光源物距为 u 时的规格化模糊圆直径, 则图 3-1 中的模糊圆直径为:

$$d'' = Ds \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{s} - \frac{1}{u} \right) \quad (3-12)$$

图像的放大倍数随 s 变化而变化。为了便于计算, 可以将不同放大倍数的图像规格化成固定的放大倍数。如: 以 s 拍摄的图像可以按照 s 的比例缩小为单位放大倍数。将放大倍数规格化图像中的模糊圆直径定义为模糊参数:

$$d = D \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{s} - \frac{1}{u} \right) \quad (3-13)$$

$$d' = D \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{s} - \frac{1}{u'} \right) \quad (3-14)$$

$$\text{显然,} \quad d = d' + D \left(\frac{1}{u'} - \frac{1}{u} \right) \quad (3-15)$$

相机 PSF h 中用 d' 替代 \mathbf{e} , 使得其维数减少为 1 (一维标量 d' 取代了三维向量 \mathbf{e})。参照物距 u' 可以是任意的, 为了便于使用, 根据等式(3-16)设定其值:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{u_{\min}} + \frac{1}{u_{\max}} \right) \quad (3-16)$$

u_{\min} 和 u_{\max} 分别是能够拍摄成像的最小物距和最大物距。由等式(3-14)可以看出, 模糊参数 d' 为关于成像参数 (s, f, D) 的函数, 即 d' 为关于 \mathbf{e} 的函数, 可以记为 $d'(\mathbf{e})$; 由等式(3-15)可以看出, 模糊参数 d 为关于成像参数 (s, f, D) 及 $u(x, y)$ 的函数, 可以记为 $d(\mathbf{e}, u(x, y))$ 。对于 $i=1, 2, 3, \dots$, 以成像参数 \mathbf{e}_i 拍摄的图像为 $g_i(x', y')$, 等式(3-11)可以写成:

$$g_i(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) h(x, y, x', y') d(\mathbf{e}_i, u(x, y), d'(\mathbf{e}_i)) dx dy \quad (3-17)$$

在调节相机成像参数 \mathbf{e}_i 过程中, 同一时间可以任意调节一个参数、两个参数, 也可以同时调节三个参数。实际应用中, 用得较多的是同一时间只调节一个参数或者两个参数, 而保持其它参数不变。也就是单独调节 f 或者 s , 或者同时调节 s 和 f , 但是不包括调节 D 。在这种情况下, 调节参数使得图像 $g_i(x', y')$ 在 i 增加时, d' 单调变化。图像序列则变成 $g(x', y', d')$:

$$g(x', y', d') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) h(x, y, x', y', d, d') dx dy \quad (3-18)$$

如果 $\frac{1}{f}$ 的变化量为 δ , 或者 $\frac{1}{s}$ 的变化量为 δ , 又或者 $\frac{1}{f}$ 、 $\frac{1}{s}$ 同时变化且 $\frac{1}{f} - \frac{1}{s}$

的变化量为 δ , 则 d 和 d' 的变化量均为 $D\delta$ 。所以:

$$g(x', y', d') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) h(x, y, x', y', d' - d) dx dy \quad (3-19)$$

近轴几何光学成像模型中, 等式(3-19)可以简化成三维卷积表达式:

$$g(x', y', d') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F'(x, y, d) h(x' - x, y' - y, d' - d) dx dy dd \quad (3-20)$$

$$\text{式中, } F'(x', y', d') = \begin{cases} F(x, y) & d(\mathbf{e}, u(x, y)) = 0 \text{ or } d' = -D\left(\frac{1}{u'} - \frac{1}{u}\right) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-21)$$

等式(3-20)可以写成:

$$g(x', y', d') = F(x', y', d') * h(x', y', d') \quad (3-22)$$

式中 $*$ 表示卷积算子。实验表明通过规格化模糊圆直径来确定点扩散函数 PSF 更易于推导出卷积表达式, 而点扩散函数 PSF 与模糊圆直径成非线性关系时不能推导出卷积表达式。当然, 直接确定 s 和 f 的值不可能推导出卷积表达式。

等式(3-22)成立的前提是保持参数 D 不变而调节 s 和 f 。如果 D 变化, 则等式不再成立。因为 $d' - d = -D(\frac{1}{u} - \frac{1}{u})$, 所以 $d' - d$ 关于 $(x, y, u(x, y))$ 不再是常数, 而会随着 $u(x, y)$ 的变化而变化。这时:

$$g(x', y', d') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F'(x, y, d) h(x' - x, y' - y, d', d) dx dy dd \quad (3-23)$$

在 (x', y', d') 空间也就是 (x', y', e, u) 空间中, 模糊参数 $d(e, u(x', y')) = 0$ 或者模糊圆直径 $R = D(\frac{1}{f} - \frac{1}{s} - \frac{1}{u}) = 0$ 确定了与对焦图像面(Focused Image Surface, 简称 FIS) 对应的多维空间。对焦图像面 FIS 上的亮度分布即为对焦图像。

3.5.2 IFDA 算法的理论基础

本文所提出的 IFDA 算法是建立在对焦深度法 IFA 和离焦深度法 IDA 的基础上, 是一种综合了 IFA 和 IDA 两种算法的优点的算法。下面我们分别介绍对焦深度法 IFA 和离焦深度法 IDA。

一、对焦深度法 (Image Focus Analysis, IFA)

IFA 需要处理大量的不同成像参数拍摄的三维图像。图像序列中, 任何个体的最佳对焦图像都只有一个。每帧图像中, 每个个体与镜头之间的距离决定了它在图像中的模糊程度。为了得到所有个体的最佳对焦距离, 我们必须分析处理图像序列中的所有图像。根据每帧图像所对应的相机成像参数, 我们可以得到这些最佳对焦距离。

某种意义上, 物与像可以互换, 即像之像即为物体本身。由于对焦图像面 FIS 上的亮度分布即为对焦图像, 因此 FIS 与物体表面有着一一对应的关系。物体表面的几何形状与能量分布由对焦图像面 FIS 和对焦图像唯一确定。传统的 IFA 法是通过连续调节 s 或者连续调节 f 来得到图像序列^{[47][48][49][50]}, 如图 3-4 和图 3-5 所示。

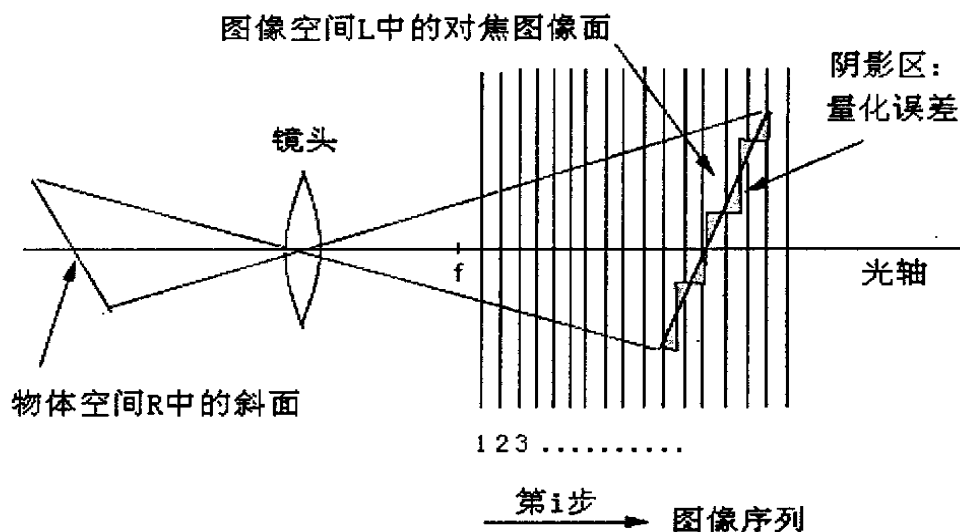


图 3-4 对焦图像面

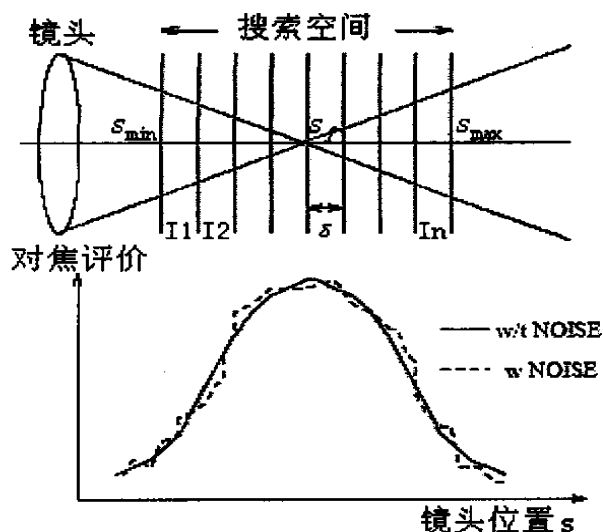


图 3-5 对焦深度分析

对于图像序列中的每帧图像，计算每个像素 15 邻域的对焦评价函数。在每个像素上，通过搜索程序找到图像序列中评价函数值最大的图像。该图像的像素灰阶给出了与之对应的对焦图像的像素灰阶，它所对应的 s 和 f 可以用于计算像素点所对应的物点距离。IFA 法包含搜寻评价函数最大的 s 和 f ，这就需要采集处理大量的图像，也就需要在拍摄前花费大量时间调整成像参数。这些时间包括相机部件的机械运动，这些运动通常比电子计算来得慢，并且整个相机参数调整过程中，景物必须保持静止。

二、离焦深度法 (Image Defocus Analysis, IDA)

IDA 法就是根据物体的离焦程度以及与物体对应的成像参数来确定物距和对焦图像, 而不再需要物体对焦^{[51][52][53][54][55]}。IDA 法不需要搜寻对应于对焦物体的 f 和 s 值, 它只需要几帧图像就足够确定所有物体的位置。但它有两个缺点: (1) 需要精确检测相机特性, 将点扩散函数 PSF 作为不同成像参数的函数; (2) 精度不及 IFA。本文分别给出了 Fourier 域^[56]和空间域^[57]中 IDA 的情况。

(一) Fourier 域

根据近轴几何光学原理^[58], 图 3-1 所表示的光学成像模型中模糊圆的规格化半径为:

$$R = \frac{D}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s} \right) \quad (3-24)$$

设相机 PSF 为二维高斯函数:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad \sigma = cR \quad (3-25)$$

c 为相机常数。该成像模型中, 平面物体在物距为 u 时的模糊图像 g 等于与之相对应的对焦图像 f 与相机 PSF h 的卷积, 即 $g = h * f$ 。在 Fourier 域中就是:

$G(w, v) = H(w, v)F(w, v)$, $H(w, v) = e^{-\frac{1}{2}(w^2+v^2)\sigma^2}$ 。对于以不同的相机成像参数 e_1 、 e_2 拍摄的模糊图像 g_1 和 g_2 , 有: $G_1(w, v)/G_2(w, v) = e^{-\frac{1}{2}(w^2+v^2)(\sigma_1^2-\sigma_2^2)}$, 即:

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = \frac{-2}{w^2 + v^2} \ln \frac{|G_1(w, v)|}{|G_2(w, v)|} \quad (3-26)$$

$$\text{从而: } \sigma_1 = c \frac{D_1}{2} \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s_1} \right), \sigma_2 = c \frac{D_2}{2} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s_2} \right) \quad (3-27)$$

$$\text{消去 } \frac{1}{u}, \text{ 可以得到: } \sigma_1 = \alpha\sigma_2 + \beta \quad (3-28)$$

$$\text{式中, } \alpha = \frac{D_1}{D_2}, \quad \beta = cD_1 \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} \right)$$

将 α 与 β 代入等式(3-26):

$$(\alpha^2 - 1)\sigma_2^2 + 2\alpha\beta\sigma_2 + \beta^2 = \frac{-2}{w^2 + v^2} \ln \frac{|G_1(w, v)|}{|G_2(w, v)|} \quad (3-29)$$

式中只有一个未知量 σ_2 ，可以很容易求得。但该方程是一个双解方程，方程的双解引起双重不确定性，当然这种双重不确定性是可以解决的^{[52][55][56][57]}。根据 σ_2 的解我们可以很容易求得物距 u 。

理论上，根据两帧离焦图像来确定物距是绝对可行的。在所有的图像邻域重复上述步骤，可以只由两个以不同参数拍摄的模糊图像来得到所有景物的距离信息。但是高斯 PSF 模型产生的是闭式解，而一般的闭式解并不能产生实际的相机 PSF。T. Wei 给出了设置任意 PSF^[56]的情况，可以解决这个问题。

(二) 空间域

对于二维图像，如果将对焦图像 f 与圆形对称的相机 PSF h 相卷积可以产生模糊图像 g ，则模糊图像 g 为对焦图像 f 关于内核函数 h 的 S 变换^[59]：

$$g(x, y) = f(x, y) + \frac{h_2}{2} \nabla^2 f(x, y) \quad (3-30)$$

h_2 为内核函数 h 关于 x 和 y 的第二力矩， $h_2 = \iint x^2 h(x, y) dx dy = \iint y^2 h(x, y) dx dy$ ， ∇^2 为 Laplacian 算子。

同样，根据等式(3-30)，可以看出：模糊图像 g 关于力矩向量 $(1, h_2)$ 的 S 逆变换等于对焦图像 f ： $f(x, y) = g(x, y) - \frac{h_2}{2} \nabla^2 g(x, y)$

对于前面已经用过的高斯 PSF 模型，有： $h_2 = \sigma^2 / 2$ 。因此，如果将两帧以成像参数 \mathbf{e}_1 和 \mathbf{e}_2 所拍摄的模糊图像 g_1 、 g_2 与模糊参数 σ_1 、 σ_2 相对应，则：

$$f = g_1 - \frac{\sigma_1^2}{4} \nabla^2 g_1, \quad f = g_2 - \frac{\sigma_2^2}{4} \nabla^2 g_2 \quad (3-31)$$

根据等式(3-31)、(3-28)以及 $\nabla^2 g_1 = \nabla^2 g_2$ ，我们可以得到：

$$(\alpha^2 - 1)\sigma_2^2 + 2\alpha\beta\sigma_2 + \beta^2 = \frac{4(g_1 - g_2)}{\nabla^2 g_1} \quad (3-32)$$

该等式与等式(3-29)左边相同右边不同。因此很容易解出 σ_2 的二次方程，从而求出物距 u 。

由于 IFA 对焦精度较高,但是计算时间长;而 IDA 则对焦速度快,但精度不够。综合考虑 IFA 和 IDA,取它们的优点,IFDA 正是这样一种算法。本文数码相机自动对焦系统就是采用 IFDA 算法根据可变数量的模糊图像重建恢复清晰的图像。

3.5.3 对焦离焦深度法(Integrated Focus and Defocus Analysis, IFDA)

IDA 法只要处理大约 2~3 帧图像就可以重建恢复清晰的图像,但是它却需要相机 PSF h 的全部信息;而 IFA 法恢复重建清晰图像则需要处理大量的图像,但是它仅仅需要较少相机 PSF h 的信息。并且 IFA 不需要规格化相机系统,IDA 却需要规格化相机系统。因此我们可以认为 IDA 和 IFA 在图像数量和相机 PSF h 的信息使用方面,是有可能方法中的两个极端。可以设计一种处于两个极端之间的可能方法,使用少于 IFA 但多于 IDA 的图像信息,多于 IFA 但是少于 IDA 的相机 PSF h 信息,并且将成像参数 e_i 作为附加未知量。IFDA 法正是这样一种算法,它综合了传统的 IDA 法和 IFA 法的优点和特征。

对于 $i=0,1,2,\dots,I-1$,以参数 s_i 拍摄序列图像 $g_i(j,k)$ ($j=0,1,2,\dots,J-1$, $k=0,1,2,\dots,K-1$)。 J 、 K 分别为图像像素的行和列, I 为图像帧数,如图 3-4、3-6 所示。IFDA 算法的目的就是在该图像序列中找出物体的对焦图像面 FIS $i_v(j,k)$ 。对焦图像面 FIS 上的灰阶即为对焦图像 $F(j,k)$, $F(j,k)=g(i_v(j,k),j,k)$ 。

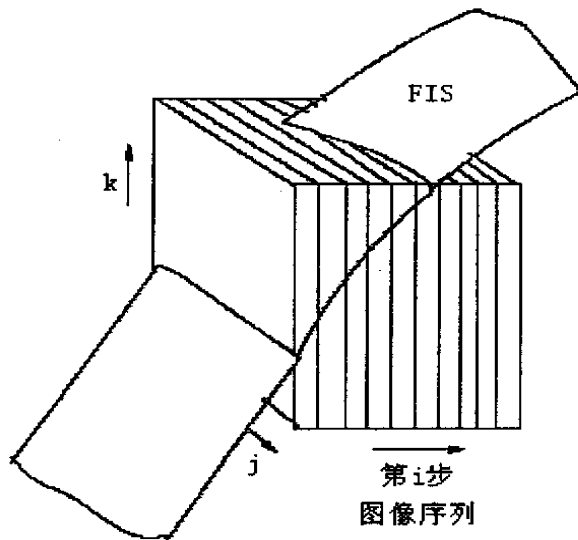


图 3-6 图像集

IFA 与 IDA 的未知量均为 FIS $i_v(j,k)$ 和对焦图像 $F(j,k)$ 。如果图像有 J 行 K

列个像素, 则 $i_v(j, k)$ 和 $F(j, k)$ 的未知量个数均为 JK , 这样总的未知量个数就是 $2JK$ 。为了确定这些未知量, 以相机成像参数 e_i 拍摄图像序列 $g(j, k)$, 用三维图像集数据 $g(i, j, k)$ 表示该图像序列, I 表示图像帧数, 如图 3-6 所示。 $g(i, j, k)$ 由 e_i 、 $i_v(j, k)$ 及 $F(j, k)$ 确定, 这是由相机特性决定的。我们用近轴几何光学成像模型说明这个问题。在成像模型中, 点扩散函数 PSF $h(e_i, i, j, k)$ 可以定义为: 单一点光源在完全对焦状态下, 以相机参数 e_i 拍摄图像 $g(i, j, k)$, 其亮度为一个单位。这样, 对于对焦图像为 $F(j, k)$, 对焦图像面 FIS 为 $i_v(j, k)$ 的任意景物来说, 图像 $g(i, j, k)$ 可以表示为:

$$g(i, j, k) = \sum_m \sum_n F(m, n) h(e_i, i, j, k, m, n) \quad (3-33)$$

如果参数 D 不变而通过调节参数 s 和 f 来调节相机成像参数 e_i , 则图像 $g(i, j, k)$ 可以近似表示为 $g'(i, j, k)$:

$$g'(i, j, k) = \sum_m \sum_n F(m, n) h(e_i, i - i_v(m, n), j - m, k - n) \quad (3-34)$$

从而重建恢复三维景物的外形和对焦图像可以表示成最优化问题。这就要求图像 $g(i, j, k)$ 与恢复重建的图像 $g'(i, j, k)$ 之间的均方差 E 为最小值:

$$E = \sum_i \sum_j \sum_k (g(i, j, k) - g'(i, j, k))^2 \quad (3-35)$$

$g'(i, j, k)$ 可以根据相机 PSF h 、当前已知的最佳 $i_v(j, k)$ 和 $F(j, k)$ 根据等式(3-34)求得。三维景物的外形和对焦图像的初始值可以使用传统的 IDA 及 IFA 求得, 并且可以使用最优化技术逐步优化改善。

如果景物中包含许多形状不同、位置不同的物体, 则 IFDA 算法可以简单概括为: 首先从图像序列中选取 3~5 帧相距较远的图像, 使用 IDA 大略估计出景物的对焦图像面 FIS $i_v(j, k)$, 在该对焦图像面 FIS $i_v(j, k)$ 周围选取另外的图像, 而在 $i_v(j, k)$ 估计值范围之外则不再选择任何图像, 这样可以避免边界效应和图像重叠问题, 从而减小对焦图像面 FIS $i_v(j, k)$ 估计值的误差。然后再使用 IFA 和插值或者 IFDA 算法来改善优化对焦图像面 FIS $i_v(j, k)$ 的估计值。当然同样可以直接对较少帧数的图像序列采用 IFDA 法来恢复重建清晰的图像。但是如果缺乏较好的初始估计值, 则计算量将非常的大。如果给定的图像超过两个, 则可以以成像参数的形式引入附加未知量, 再使用 IFDA 算法来最小化噪音的影响。

第四章 IFDA 算法的实现和对焦评价函数

本文在第三章中提出了一种新的根据数量可变的模糊图像重建恢复清晰图像的算法,即 IFDA 算法。由于三维景物的外形和对焦图像的重建恢复问题可以简单地表示成最优化问题,就是最小化实际拍摄图像与恢复重建图像之间的误差,因此必须给出使得该误差达到最小的计算方法,同时给出判断误差最小的依据。本章采用最优化方法来最小化实际拍摄图像与恢复重建图像之间的误差,并给出了几种能够作为判断依据的对焦评价函数。在分析比较几种不同的最优化方法性能的基础上,本文给出了优化效果最佳的方法。

4.1 最优化方法

本章给出三种最优化方法来最小化实际拍摄图像与重建恢复图像之间的误差。三种规格化方法分别是梯度下降法、局部搜索法以及规格化方法。前两种方法均是通过搜寻使得局部误差最小的参数解决最优化问题,第三种方法则是采用变量微积分原理解决最优化问题。

4.1.1 梯度下降法

梯度下降法通过迭代使得误差函数梯度下降来寻找最低点。实际应用中将三维外形近似为分段平面,则 8 邻域上的对焦图像可以近似为平面:

$$i_v(j, k) = i_0 + \tan \theta_x j + \tan \theta_y k \quad (4-1)$$

i_0 为分段平面与光轴的交点距离,它与 x 轴的夹角为 θ_x ,与 y 轴的夹角为 θ_y 。梯度向量用误差函数关于 i_0 , θ_x , θ_y 的偏导数表示。三维外形的初始值由 IDA 或者 IFA 给出。每次迭代都是通过调整误差梯度的参数来优化估计值。当误差不再减小时,迭代进程停止。最终的误差值取决于物体的外形和对焦图像。

梯度下降法有三种形式:(1) 顺序参数搜寻(Sequential Parameter Search, SPS):只考虑一个参数使得误差最小;(2) 并行参数搜寻(Parallel Parameter Search, PPS):同时考虑梯度向量的所有参数使得误差最小;(3) 顺序并行参数搜寻(Sequential and Parallel Parameter Search, SPPS):应用 SPS 后再应用 PPS。

4.1.2 局部搜寻法

局部搜寻法是一种迭代误差最小化方法,它在初始值每个像素周围小范围内搜寻最佳对焦图像面 FIS。实际应用中,使用 SPS 求得初始值。每次迭代都是在各个像素上沿着误差减小的方向单位调整对焦图像面 FIS 的外形来优化该初始值。这种方法精度高,但是计算时间较长。

4.1.3 规格化方法

图 3-1 所示的成像系统中,记离焦图像为 $g_o(x, y, d)$,对焦图像为 $F_o(x', y')$,对焦图像面 FIS 为 $d_o(x', y')$ 。对焦图像初始值为 $F_e(x', y')$, FIS 初始值为 $d_e(x', y')$,则根据等式(3-20)、(3-21)可以算出恢复图像 $g_e(x, y, d)$ 。定义相似函数 E_i :

$$E_i = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (g_o(x, y, d) - g_e(x, y, d))^2 dx dy dd \quad (4-2)$$

定义稳定函数 E_s 为 FIS 初始估计值 $d_e(x', y')$ 的 Laplacian 平方函数:

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\nabla^2 d_e(x, y))^2 dx dy \quad (4-3)$$

需要最小化的价值函数 E 记为: $E = E_i + \lambda E_s$, λ 为控制规格化程度的权值系数。最小化的结果受深度和图像亮度(8 位像素灰阶)的限制,它们必须为正,也就是: $0 \leq u'_e(x', y')$, $0 \leq g_e(x, y, d) \leq 255$ 。此外,最小过程中必须保证局部误差随着迭代逐渐减小,否则当前迭代不更新结果,结果可以在后面的迭代中更新,即: $e_i^n(x, y) \leq e_i^{n-1}(x, y)$, n 表示迭代次数,局部误差记为:

$$e_i(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} (g_o(x, y, d) - g_e(x, y, d))^2 dd \quad (4-4)$$

根据变量微积分原理^{[17][55][56]},最小化价值函数 E 等价于解相应的欧拉方程。为了获得该欧拉方程,需要更明确地表示 E 。定义新函数 $F_e''(x', y', d) = F_e(x', y')$, $F_e(x', y')$ 为估计的对焦图像。显然, F_e'' 与 d 无关, (x', y', d) 空间中估计的 FIS 结构由 $\delta(x', y', d - d_e(x', y'))$ 详细给出, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克 Δ 方程。恢复图像 $g_e(x, y, d)$ 可以表示为:

$$g_e(x, y, d) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_e''(x', y', d') \cdot \delta(x', y', d - d_e(x', y')) \cdot h(x - x', y - y', d - d') dx' dy' dd' \quad (4-5)$$

根据 $\delta(\cdot)$ 函数的过滤特性^[57], 等式(4-5)可以写成:

$$g_e(x, y, d) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_e(x', y', d_e(x, y)) \cdot h(x - x', y - y', d - d_e(x, y)) dx' dy' \quad (4-6)$$

式中并没有关于 d 的积分。由于图像只会在 $d_e(x, y)$ 处对焦，则：

$$g_e(x, y, d) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_e(x', y') \cdot h(x - x', y - y', d - d_e(x, y)) dx' dy' \quad (4-7)$$

价值函数 E 可以表示为：

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(d_e, \nabla^2 d_e(x, y)) dx dy \quad (4-8)$$

$$F(d_e, \nabla^2 d_e(x, y)) = \int_{-\infty}^{\infty} (g_0 - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_e(x', y') \cdot h(x - x', y - y', d - d_e(x, y)) dx' dy')^2 dd + \lambda \cdot (\nabla^2 d_e(x, y))^2 \quad (4-9)$$

因此，最小化价值函数 E 的必要条件就是下面的欧拉方程^[55]：

$$F_{de} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} F_{dexx} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} F_{deyy} = 0 \quad (4-10)$$

F_{de} , F_{dexx} , F_{deyy} 为 F 关于 d_e , d_{exx} , d_{eyy} 的偏导数。 d_{exx} 和 d_{eyy} 为 d_e 关于 x 和 y 的二次偏导数。

根据等式(4-9)有：

$$F_{de} = \frac{\partial}{\partial d_e} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (g_0 - g_e)^2 dd \right\}, \frac{\partial^2}{\partial x^2} F_{dexx} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} F_{deyy} = 2\lambda \cdot \nabla^2 (\nabla^2 d_e) \quad (4-11)$$

$$\text{所以，欧拉方程可以写成：} \quad \frac{\partial}{\partial d_e} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (g_0 - g_e)^2 dd \right\} + 2\lambda \cdot \nabla^2 (\nabla^2 d_e) = 0 \quad (4-12)$$

等式(4-12)的离散形式可以由下面的程序获得。首先，离散形式的 Laplacian 模糊参数 $\nabla^2 (\nabla^2 d_e)$ 可以表示为 $k \cdot (d_{j,k} - \bar{d}_{j,k})$ ^[17]， (j, k) 为关于图像坐标 (x, y) 的离散像素坐标。 $d_{j,k}$ 为 (j, k) 处表示离焦程度的模糊参数。 $\bar{d}_{j,k}$ 和 k 可以通过将 $d_{j,k}$ 与一个双调和算子的计算因子相卷积得到，图 4-1 给出了双调和算子的模型。

		1		
	2	-8	2	
1	-8	20 (j, k)	-8	1
	2	-8	2	
		1		

图 4-1 双调和算子模型

从图中我们可以看出：

$$\bar{d}_{j,k} = \frac{1}{20} [8 \cdot (d_{j+1,k} + d_{j,k+1} + d_{j-1,k} + d_{j,k-1}) - 2 \cdot (d_{j+1,k+1} + d_{j+1,k-1} + d_{j-1,k+1} + d_{j-1,k-1}) - (d_{j,k+2} + d_{j,k-2} + d_{j-2,k} + d_{j,k-2})] \quad (4-13)$$

式中 $k=20$ 。估计出等式(4-12)的第一项 $\frac{\partial}{\partial d_e} F$ ，则欧拉方程的离散形式为：

$$\frac{\partial}{\partial d_e} \sum_d (g_0 - g_e)^2 + 2\lambda k \cdot (d_{j,k} - \bar{d}_{j,k}) = 0 \quad (4-14)$$

$$\text{从而可以推出迭代公式: } d_{j,k}^{(n+1)} = \bar{d}_{j,k}^{(n)} - \frac{1}{2\lambda k} \cdot \frac{\partial}{\partial d_e} \sum_d (g_0 - g_e)^2 \quad (4-15)$$

使用这个迭代公式，将逐渐优化三维外形的估计结果。

4.1.4 迭代算法及不同的实现方法

将下面给出的迭代算法用于规格化方法，迭代算法的步骤为：

(1) 对于对焦图像为 $F_o(x', y')$ ，深度映射为 $u_o(x', y')$ 的三维景物，记录拍摄图像 $g_o(x, y, d)$ ，与之相对应的对焦图像面为 FIS 为 $d_o(x', y')$ 。

(2) 对拍摄图像使用 IFA 法或 IDA 法求得对焦图像和 FIS 的初始值，分别记为 $F_e(x', y')$ 和 $d_e(x', y')$ 。

(3) 使用等式(4-15)逐渐更新初始值。每次迭代过程中，都使用更新值检验限制条件是否符合。如果必要，适当调整更新值以满足这些限制条件。

(4) 当误差不再减小或者已经完成最大迭代次数时，停止迭代。

很有必要选择合适的权值 λ 来平衡相似误差 E_i 与对焦图像面 FIS 的平滑度 E_s 。根据初始值, 二次误差项将逐点变化。在局部范围内该变化量可能较小, 但是从一个图像区域到另一个图像区域该变化量可能较大, 这就使得选择合适的权值 λ 变得较为困难。实验表明 λ 值取为 50 可以得到满意的结果。另外, 每次迭代给出调整值的第二项的放大倍数限制为 $0, \pm 1e, \pm 2e, \pm 3e$, e 为沿着 d 维的采样周期(大约等于一个像素)。前两次迭代中最大调整值设为 $3e$, 接下来两次迭代设为 $2e$, 然后每次迭代均设为 e , 这些迭代本身在性能上并没有显著区别, 这样迭代可以加快收敛速度。

三种最优化方法中, 梯度下降法最为简单, 局部搜寻法次之, 规格化方法则在计算和应用方面较为复杂。但对于平滑物体, 规格化方法速度较快且比其他两种方法所给出的结论要好。但是它必须选择规格化参数 λ , 选择不同的 λ 会出现不同的问题, 不平滑会出现噪音, 过于平滑则会丢失相应的曲率信息^[63]。梯度下降法的效果也比较好, 并且对规格化方法不适用的粗糙物体依然适用。特别地, SPS 平衡了精确度和计算时间。SPS 的精度可以通过逐像素搜寻来改善, 但是其计算量非常之大。

4.2 最优化方法用于 IFDA 算法

IFDA 算法处理的是可变数量的图像, 因此需要设计出一种能够充分利用图像而使得 IFDA 算法发挥出最大功效的系统方案。IFDA 算法主要包括两个步骤: 首先估计三维外形和对焦图像的初始值; 再使用最优化方法根据给定的初始值和图像成像模型来最小化拍摄图像与恢复图像间的误差, 从而达到优化该初始值的目的。

4.2.1 初始值的获得

深度和对焦图像的初始值可以单独使用 IFA 法或 IDA 法求得, 也可以自适应综合使用 IFA 和 IDA 求得, 然后再使用 IFDA 算法优化。自适应综合使用 IFA 和 IDA 求得初始值主要包括四种情况。

1. 如果输入图像数量足够, 单独使用 IFA 就能够快速地求得精确的结果。
2. 使用 IDA 处理图像序列中的两帧模糊图像来求得深度初始值, 然后在该初始值周围使用 IFA 处理大量的图像求得更精确的值。

3. 如果图像为 3~5 帧, 则首先使用 IFA 法处理这些图像以确定出对焦较好的图像, 再使用 IDA 处理该对焦图像及其周围的图像以求得更精确的值。
4. 如果只有两帧可以使用, 当然只好由 IDA 估计深度信息和对焦图像。

拍摄图像用 $g(x, y, d)$ 表示, x, y 表示像素, d 表示模糊参数。图像用 8 位二进制表示, 因此可以假设 g 取 0~255 之间的整数。假设 d 为无限远处的点光源所形成模糊圆的直径, $d = D_s(\frac{1}{f} - \frac{1}{s})$ 。将 d 指定为单位像素宽度的 0.6 倍, 则 $d=2$

表示模糊圆直径等于像素宽的 1.2 倍。将图像分成许多个子图像并加以处理, 子图像的尺寸取为 32×32 , 则 x, y 取 0~31 之间的整数。实验中, 我们假设 d 取 0~99 之间的整数, 则景物对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 也就取 0~99 之间的整数。

图像 $g(x, y, d)$ 可以看成是 (x, y, d) 空间的“图像集”, 它包含了对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 。对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 确定了对焦图像 $F(x, y)$: $F(x, y) = g(x, y, d_v(x, y))$ 。

在每帧图像中, 都可以将对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 看成分段常数或者分段平面, 也可以看成平滑曲面。处理全部或者部分图像, 可以求得与对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 相对应的三维外形和对焦图像 $F(x, y)$ 。

实验中的图像为不同 d 所对应的图像 $g(x, y, d)$ 的横截面, d 取为 d_1, d_2, \dots, d_n 。假设这些图像沿着 d 维方向排开, 并且占满对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 所给的范围。

IFA: 计算所有图像 8 邻域的评价函数; 评价函数最大时, $d=d_i$ 。 $d_v(x, y)=d_i$ 给出了 8 邻域的对焦图像面 FIS, $F(x, y)=g(x, y, d)$ 给出了 8 邻域的对焦图像。

综合 IFA 与插值: 通过插值确定出平滑曲线来优化 IFA 的初始值。 $M(d)$ 为 $d=d_i$ 周围 8 邻域的评价函数, 则平滑曲线通过 $M(d_{i-1})$, $M(d_i)$ 以及 $M(d_{i+1})$, 并且 $M(d)$ 最大时, $d=d_f$ 。根据 $d_v(x, y)=d_f$, 可以对点 $g(x, y, d_{i-1})$, $g(x, y, d_i)$ 和 $g(x, y, d_{i+1})$ 甚至其他点插值求出对焦图像, $F(x, y)=g(x, y, d_f)$ 。

IDA: 与 IFA 需要大量图像相比, IDA 法适用于只有两个图像的情况, 即 $d=d_j$ 和 $d=d_k$, IDA 可以估计出对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 和对焦图像 $F(x, y)$ 。

综合 IFA 和 IDA: 首先使用 IFA 找到 8 邻域最佳对焦位置 $d=d_i$, 对焦图像为 $F(x, y)=g(x, y, d_i)$, 再根据评价函数找出接近于 d_i 的次佳对焦图像位置 d_{i-1} 或 d_{i+1} , 对这两个最佳对焦图像使用 IDA 重建恢复景物外形和对焦图像。如果沿着 d 维方向的图像间距较大, 综合 IFA、IDA 要比综合 IFA 和插值的效果来得好。当图

像相距很远时, IDA 的效果要比插值来得好。

合成多个 8 邻域的估计外形和对焦图像, 就可以获得 32×32 图像区域的重建外形和对焦图像, 将其作为 IFDA 的初始值, 并通过误差最小化进一步优化。

如果沿着 d 维方向图像间距只为 1, 则 IFA 可以给出很好的结果; 如果间距为 2~4, 则综合插值和 IFA 的效果较好; 如果间距为 5 或者更大, 则综合 IFA 和 IDA。在所有情况下, 如果给出的图像为 2 帧, 则只能使用 IDA。

如果图像动态获得, 则首先拍摄两个离得很远的图像, 如 $d=20$ 和 $d=50$, 然后使用 IDA 寻找大略的深度信息, 从而求得 FIS $d_v(x, y)$ 的最大近似值 d_{max} 和最小近似值 d_{min} , 最后在 $d_{min} \sim d_{max}$ 之间拍摄图像, 这样可以避免不必要的图像。

本文根据传统的方法获得初始值。首先, 拍摄图像序列, 将它们分成 8×8 的子图像并在每两个或每四个图像间隙上计算每个子图像的评价函数。在每个 $32 \times 8 \times 8$ 图像空间中找出具有最大评价函数的子图像, 用它们的位置计算三维外形, 不同区域的对焦图像合成起来就是所有物体的对焦图像。步骤如下:

(1) 将图像分成 8×8 子图像;

(2) 在每两个或四个图像间隙上计算 8 邻域的评价函数。如果对焦位置既不是最近位置也不是最远位置, 则对初始对焦位置及其邻近位置通过二次插值搜寻对焦位置。获得子图像的对焦位置后, 将该对焦位置赋值给子图像的每个像素点。最后将二次插值所得的对焦位置用于以对焦位置为中心的三个相邻图像来获得对焦图像;

(3) 重复步骤(2), 直到处理完所有图像区域。

4.2.2 根据多帧图像重建恢复三维外形和对焦图像

根据初始值可以估计景物的三维外形和对焦图像, 并采用最优化方法对其结果进行优化。本文我们分别给出了使用三种最优化方法的情况, 并比较了它们各自的性能, 最终确定了最适合使用的方法。

一、梯度下降法

已知对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 、对焦图像 $F(j, k)$, 根据等式(4-25)我们可以求出图像 $g(i, j, k)$, 然后使用 IFA 得到对焦图像 $F(j, k)$ 和对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 的初始值。对 8×8 非重叠区域计算对焦评价函数。通过寻找评价函数值最大的位置

$i_v'(x, y)$, 可以求得每个 8×8 图像区域的对焦图像面 FIS, 它近似为分段常数。将这些估计值用于等式(3-34)可以得到重建恢复的图像 $g'(i, j, k)$, 再使用梯度下降法最小化 $g(i, j, k)$ 与 $g'(i, j, k)$ 之间的误差 E , E 由等式(3-35)算出。

本文实验中分别采用了梯度下降法的三种形式, 将这三种形式用于两组数据, 一组只有量化噪音, 另一组具有量化噪音和零均值的高斯随机噪音, 其标准偏差为 1.0。

图 4-2 是半径为 24 的半球体的对焦图像面 FIS, 图 4-3 则是马赛克形式的对焦图像 $F(j, k)$ 。图 4-4、4-5 分别为使用 IFA 法得到的初始对焦图像面 FIS 和对焦图像。图 4-6、4-7 分别为使用 SPS 最优化的结果; 图 4-8、4-9 分别为使用 PPS 最优化的结果; 图 4-10、4-11 分别为使用 SPPS 最优化的结果。

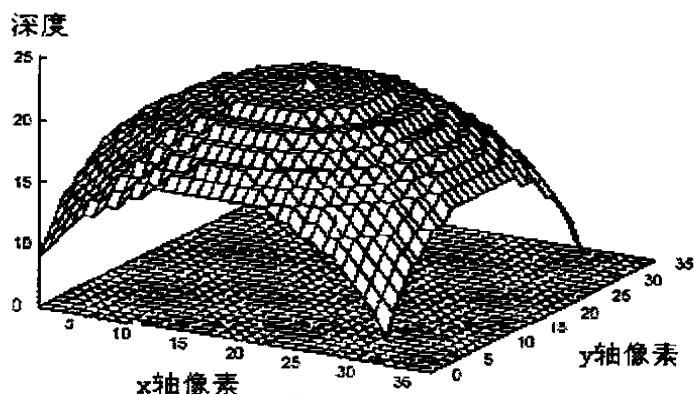


图 4-2 32×32 半球体原始对焦图像面 FIS

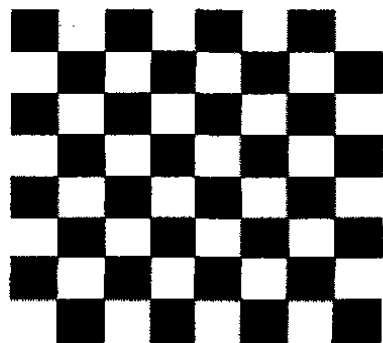


图 4-3 32×32 原始对焦图像

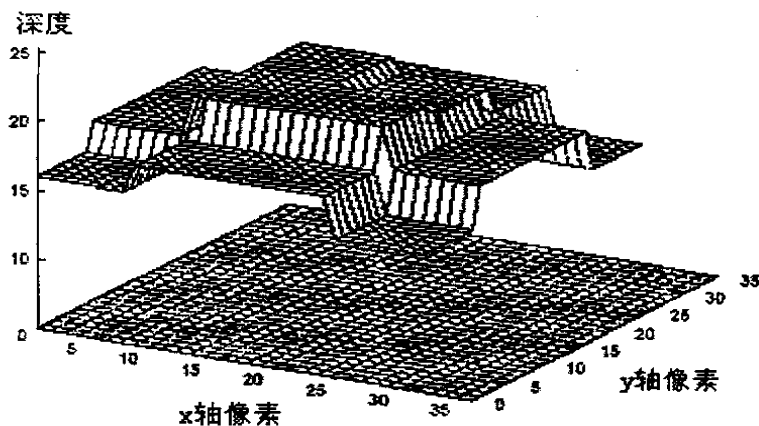


图 4-4 IFA 对焦图像面 FIS 初始值

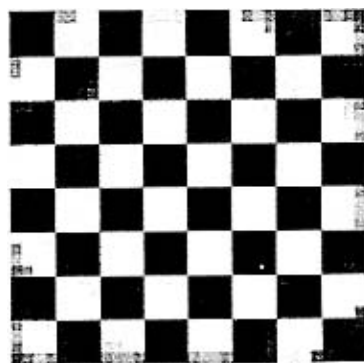


图 4-5 IFA 对焦图像初始值

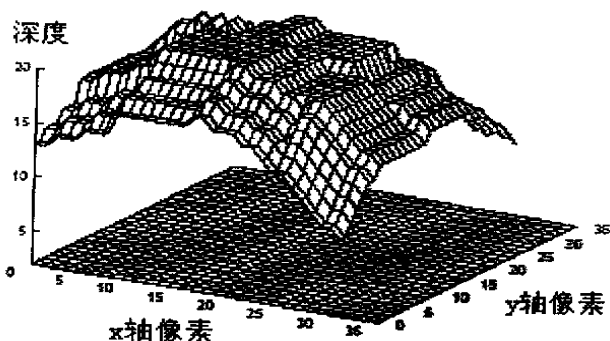


图 4-6 SPS 对焦图像面 FIS 初始值

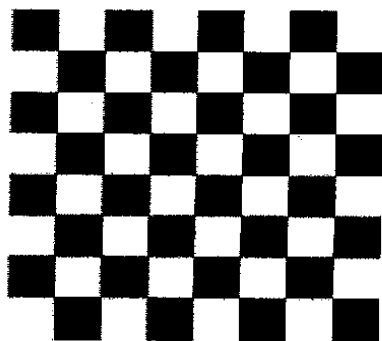


图 4-7 SPS 对焦图像初始值

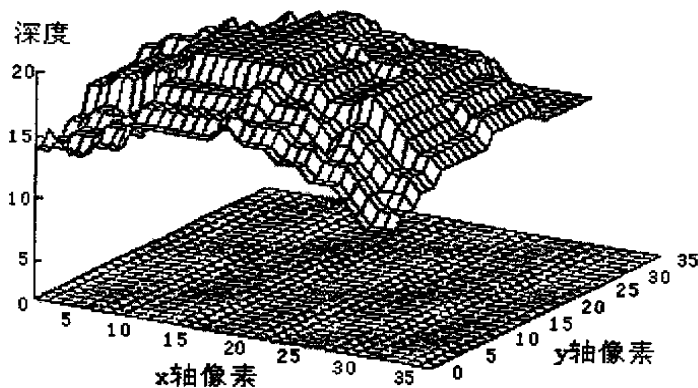


图 4-8 PPS 对焦图像面 FIS 初始值

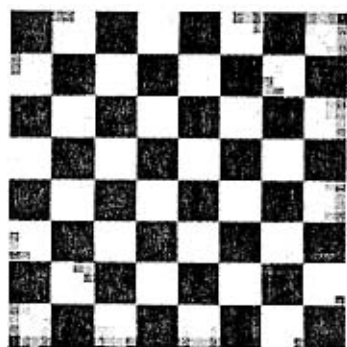


图 4-7 PPS 对焦图像初始值

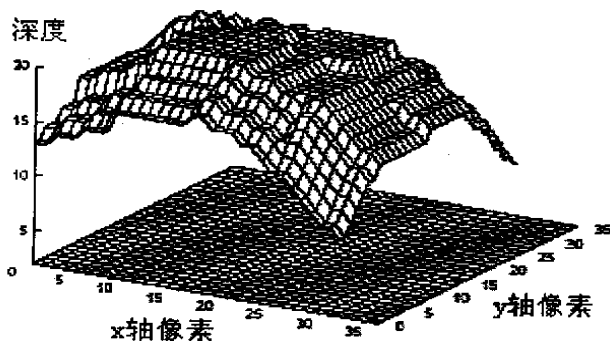


图 4-10 SPPS 对焦图像面 FIS 初始值

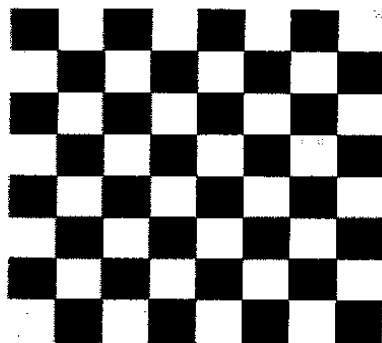


图 4-7 SPPS 对焦图像初始值

由这些图我们可以看出, 使用 SPPS 最优化的结果最为精确。实验表明: SPS, PPS 和 SPPS 的处理时间分别为 32、40 和 55 分钟, SPS, PPS 的收敛速度比 SPPS 要快得多。可以看出, 单独使用 SPS 已经足够满足精确度和计算效率的要求。此外, 在物体表面斜率小的图像域上使用最优化方法所得的改进不大, 但是在斜率大的图像域上的改进程度却比较大。表 4-1 给出了拍摄图像与重建恢复图像之

间的灰阶百分比误差。

	IFA	SPS	PPS	SPPS
量化噪音	8.75%	5.25%	7.25%	4.75%
量化、电子噪音	8.5%	5.8%	7.8%	5.26%

表 4-1 各种方法的单位像素灰阶百分比误差

二、规格化方法

规格化方法实验中同样使用图 4-2 所给的 32×32 半球体，生成类似的 $64 \times 64 \times 32$ 的图像，其对焦图像面 FIS 也是半径为 24 的半球体，对焦图像与 $32 \times 32 \times 23$ 图像模型一样，均为马赛克形式。根据 IFDA 算法，使用等式(3-20)可以求得图像 $g(i, j, k)$ ，重建恢复对焦图像和三维外形。将这些估计值用于等式(3-20)可以得到恢复图像 $g'(i, j, k)$ 。使用规格化方法最小化 $g(i, j, k)$ 与 $g'(i, j, k)$ 之间的误差 E_i ，误差 E_i 由等式(4-2)算出。

图 4-12 给出了 $64 \times 64 \times 32$ 图像模型的原始 FIS；图 4-13、4-14、4-15、4-16、4-17 分别给出了对 $64 \times 64 \times 32$ 图像模型使用规格化迭代方法从第 2 步到第 7 步的迭代结果。表 4-2 给出了 $32 \times 32 \times 32$ 和 $64 \times 64 \times 32$ 图像模型在不同的迭代步骤时的灰阶百分比误差。

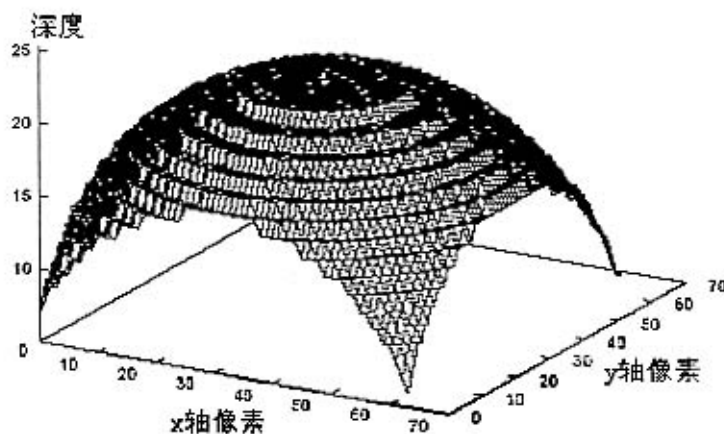


图 4-12 64×64 半球体原始对焦图像面 FIS

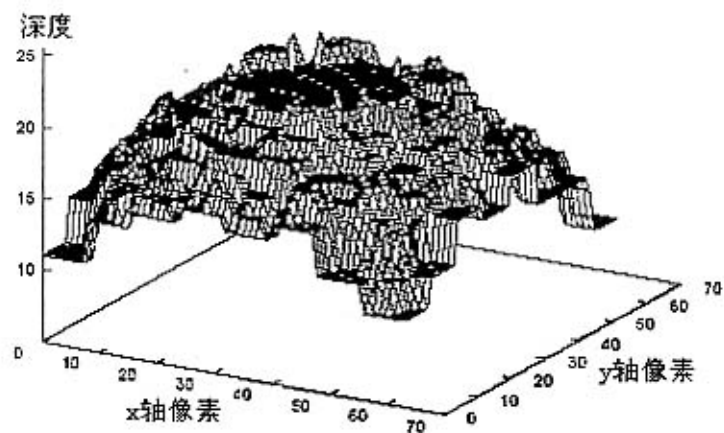


图 4-13 两次迭代所获 64×64 对焦图像面 FIS

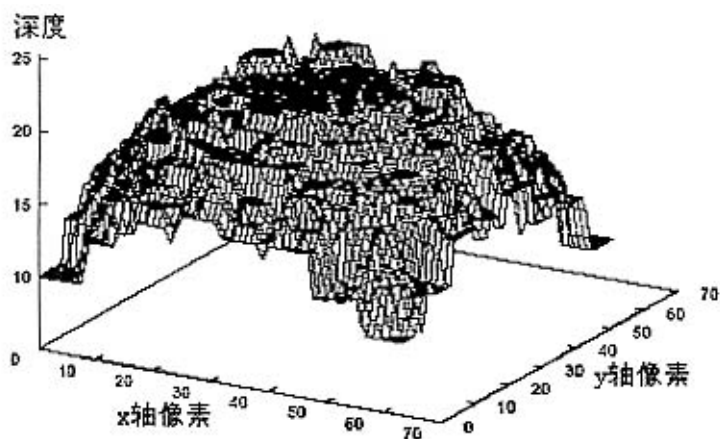


图 4-14 三次迭代所获 64×64 对焦图像面 FIS

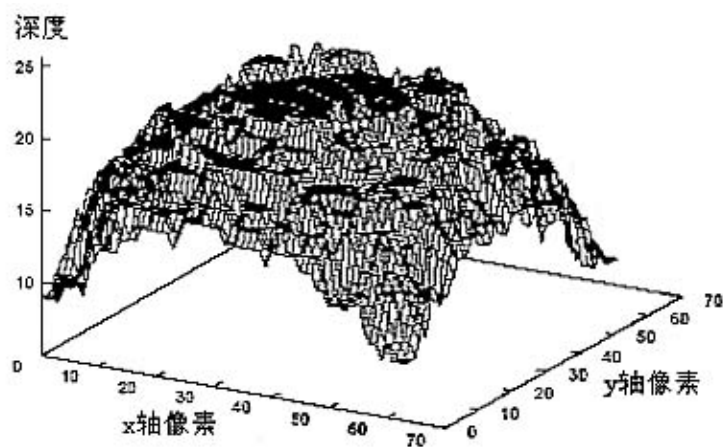


图 4-15 四次迭代所获 64×64 对焦图像面 FIS

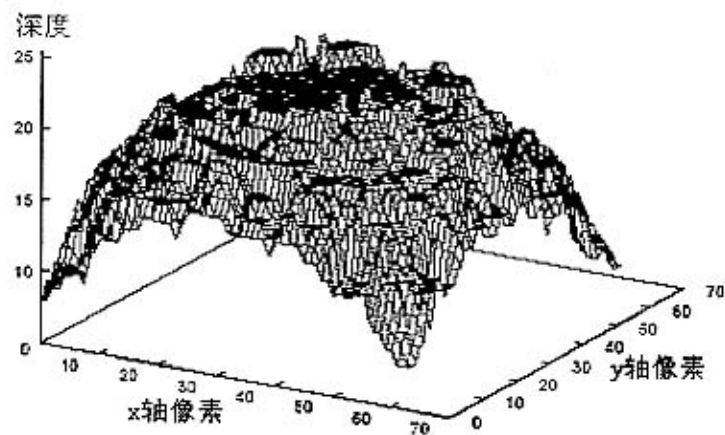


图 4-16 五次迭代所获 64×64 对焦图像面 FIS

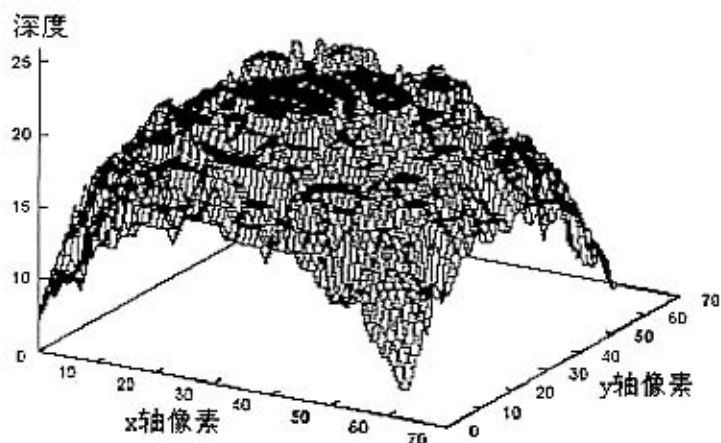


图 4-17 六次迭代所获 64×64 对焦图像面 FIS

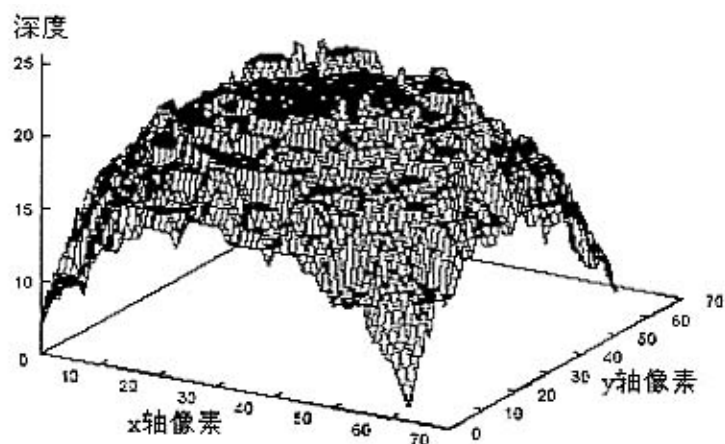


图 4-18 七次迭代所获 64×64 对焦图像面 FIS

迭代次数	32×32×32 图像模型	64×64×64 图像模型
1	6.00%	4.53%
2	4.43%	3.59%
3	3.14%	3.15%
4	2.58%	2.90%
5	2.32%	2.72%
6	2.13%	2.69%
7	2.02%	2.67%

表 4-2 规格化方法不同迭代次数的单位像素灰阶百分比误差

根据表 4-2，我们可以得出结论：使用规格化方法迭代时，迭代到第五步已经足够满足要求。

三、局部搜索法

在局部搜索法中同样使用的 32×32×32 图像模型。图 4-19、4-20 给出了局部搜索法最优化的结果。

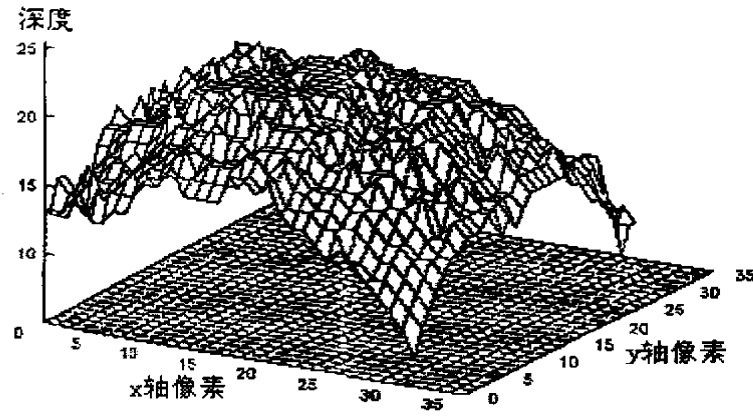


图 4-19 局部搜索法 32×32 FIS

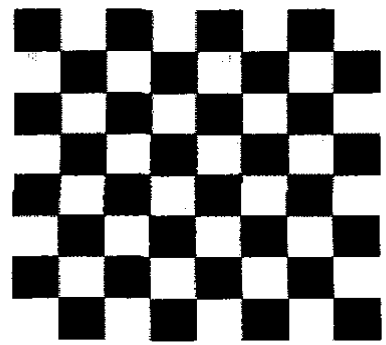


图 4-20 局部搜索法对焦图像

四、性能比较

表 4-3 给出了拍摄图像与其 32×32×32 最佳估计值之间的灰阶百分比误差以及每种最优化方法的计算时间。根据表 4-3 和重建恢复的三维外形、对焦图像，我们可以得出结论：规格化方法在精确度和计算时间方面要比其他方法好。尽管局部搜索法也能够得到较好的估计值，但是它计算时间太长。同样，梯度下降法

只能得到适度的精确度。因此，实际应用中我们推荐使用规格化方法。

	SPS	PPS	SPPS	局部搜索法	七步规格化
灰阶百分比	5.25%	7.25%	4.25%	2.89%	2.02%
计算时间	4	5	7	14	5

表 4-3 不同方法的性能比较

4.2.3 根据少数图像重建恢复三维外形和对焦图像

所谓的少数图像是指 3~5 帧图像。前面我们已经讨论过，如果图像数只有 3~5 帧，则首先使用 IFA 法处理这些图像以确定出对焦较好的图像，然后再使用 IDA 处理该对焦图像及其周围的图像以求得更精确的值。下面我们分别讨论物体为平面外形和球状外形时的图像恢复重建的情况。

一、平面物体

考虑 $32 \times 32 \times 32$ 像素的图像并根据 $d=5$ 、 $d=16$ 以及 $d=27$ 的三帧离焦图像重建恢复清晰的对焦图像。对焦图像面 FIS 为 $d_v(x, y)=13$ 所给出的平面，且对焦图像为马赛克形式。根据算法，首先使用 IFA 法确定出两帧对焦相对较好的图像。在整个 32×32 的图像区域上计算对焦评价函数，以确定出两幅对焦较好的图像，将它们用于 IDA 法中的 STM 法来求得平面物体的深度和对焦图像初始值。STM 法根据模糊参数 σ 确定深度信息和对焦图像。模糊参数 $\sigma = d/2\sqrt{2}$ ， d 为点光源的模糊圆直径。使用 STM 包括在 32×32 图像区域的每个像素上构造 σ 直方图并将该直方图模式作为对焦图像面 FIS $d_v(x, y)$ 。

估计出对焦图像面 FIS 之后，再使用三种不同的方法估计对焦图像。第一种方法建立在 S 逆变换的基础之上： $F(x, y) = g(x, y) - \frac{\sigma^2}{4} \nabla^2 g(x, y)$ ， $g(x, y)$ 为可以利用的最佳对焦图像；第二种方法建立在 Fourier 域中 Wiener 滤波器基础上；第三种方法则是对三个给定的图像采用立体样条插值。

如果在调节相机成像参数 e 时，调节 s 和 f 而保持 D 不变，则：

$$g(x, y, d) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F'(x', y', d') h(d - x', y - y', d - d') dx' dy' dd' \quad (4-16)$$

$$\text{式中 } F'(x', y', d') = \begin{cases} F'(x', y') & d' = d_v(x', y') \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

分别将三种方法所得的对焦图像面 FIS 和对焦图像作为 IFDA 算法的初始值。应用等式(4-16)求出重建恢复图像 $g_e(x, y, d)$ 。则三个图像 $g_o(x, y, d)$ 对应于三个估计图像 $g_e(x, y, d)$ 。使用梯度下降法不断最小化 $g_o(x, y, d)$ 与 $g_e(x, y, d)$ 之间的误差 E ，从而重建恢复对焦图像面 FIS 以及三种方法各自所对应的对焦图像。

图 4-21 给出了原始对焦图像；图 4-22、4-23、4-24 分别给出了使用 IFA、STM、SPS+STM 重建恢复的对焦图像。

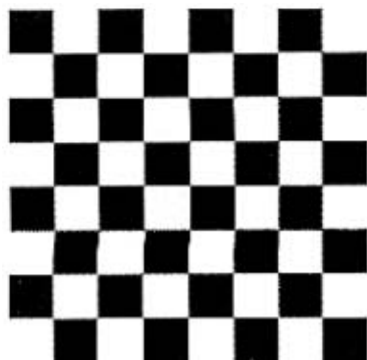


图 4-21 对焦图像原始值

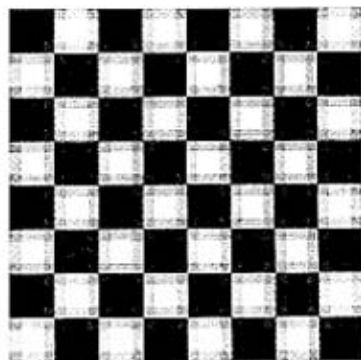


图 4-22 IFA 对焦图像

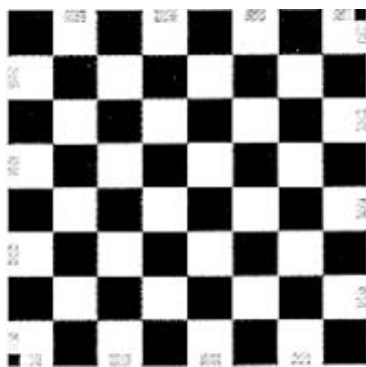


图 4-23 STM 对焦图像

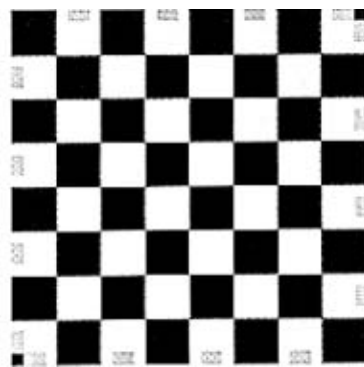


图 4-24 SPS+STM 对焦图像

图 4-25 说明不同的方法所估计的对焦位置不同。表 4-4 给出了不同方法关于拍摄图像与重建图像之间的灰阶百分比误差。

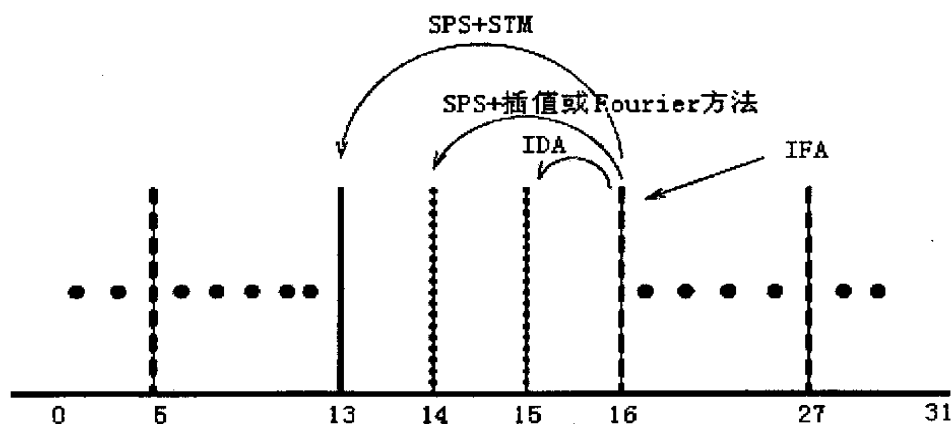


图 4-25 IFA、IDA 以及 SPS 的对焦位置

IFA	IFA+IDA	SPS+STM	SPS+插值	SPS+ Fourier
13.8%	7.6%	6.6%	8.8%	12.1%

表 4-4 平面物体每个像素的灰阶百分比误差

比较不同的结果，可以发现使用 STM 方法要比其他方法来得好。

二、球状物体

对于球状物体，使用 $d=4, 10, 16, 22, 28$ 所对应的五个图像。与平面物体一样，使用 IDA(STM)法后，再使用 IFA 法处理这些图像。此时，因为物体外形弯曲，将 32×32 图像划分为 4×4 的子图像并分别处理，对 4×4 图像综合使用 IDA 和 IFA。在应用 STM 过程中，将平滑分化滤波器^[64]尺寸选为 3×3 。这样在每个像素周围 3 邻域积分可以估计出模糊参数 σ ，从而得到 $d_v(x, y)$ 。

使用规格化方法迭代过程中，通过反复迭代将误差最小化，其最小化程度受 FIS 的平滑度控制^[65]。

图 4-26、4-27 给出了球状物体的原始对焦图像面 FIS 和对焦图像；图 4-28、4-30、4-32 分别给出了使用 IFA、STM 以及五次迭代规格化的对焦图像面 FIS；图 4-29、4-31、4-33 则给出对应的对焦图像。可以看出 STM 的重建恢复的对焦图像要比 IFA 好，但是三维外形的改进不大。这是因为 IFA 和 STM 只用于 4×4 区域，窗口太小，而 STM 对噪音很敏感。表 4-5 给出了这几种方法的灰阶百分比误差。IFDA 规格化方法所给出的初始值改善效果较为有限，其主要原因在于它不易对曲面物体的对焦图像作出较好的估计，这就使得实验中所获得的对焦图像

面 FIS 初始值的效果较差。

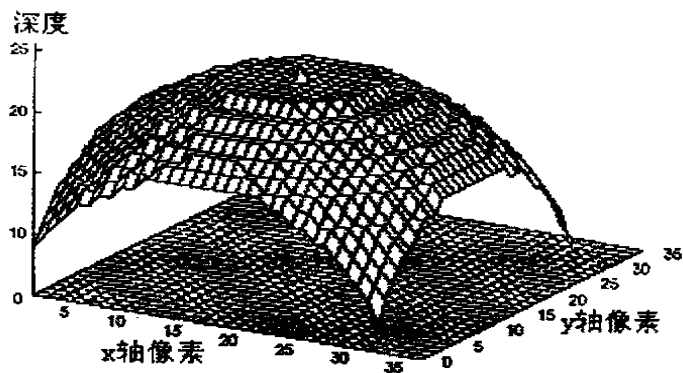


图 4-26 32×32 半球体原始对焦图像面 FIS

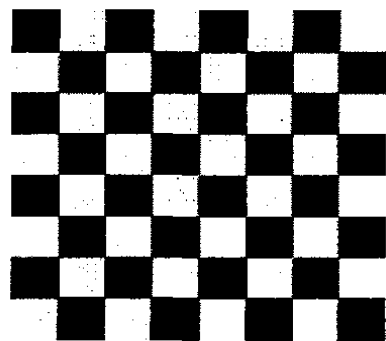


图 4-27 原始对焦图像

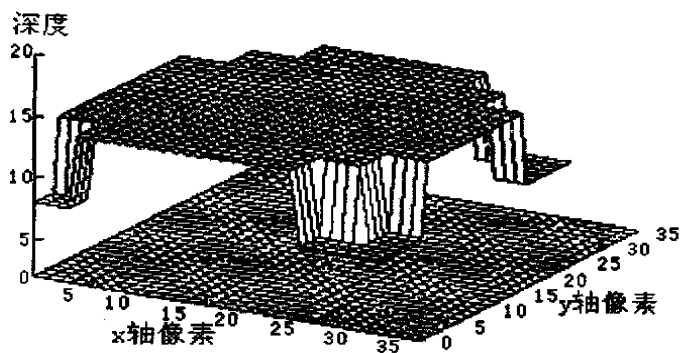


图 4-28 IFA 对焦图像面 FIS

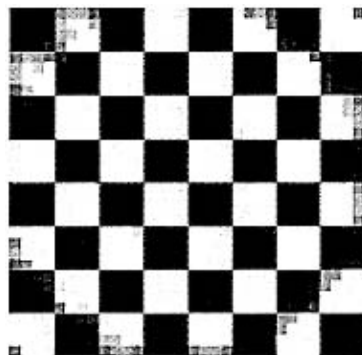


图 4-29 IFA 对焦图像

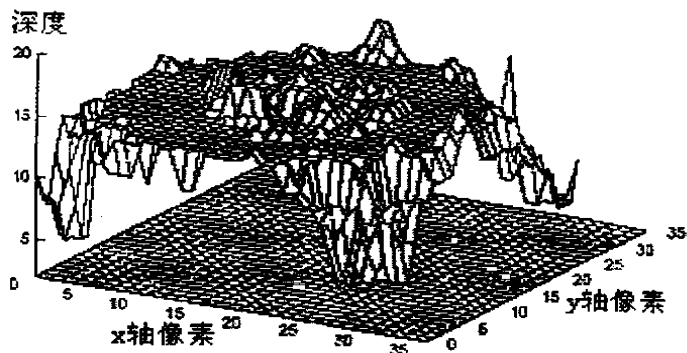


图 4-30 STM 对焦图像面 FIS

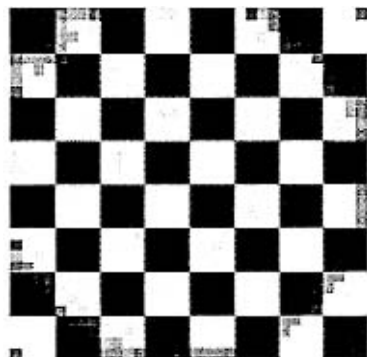


图 4-31 STM 对焦图像

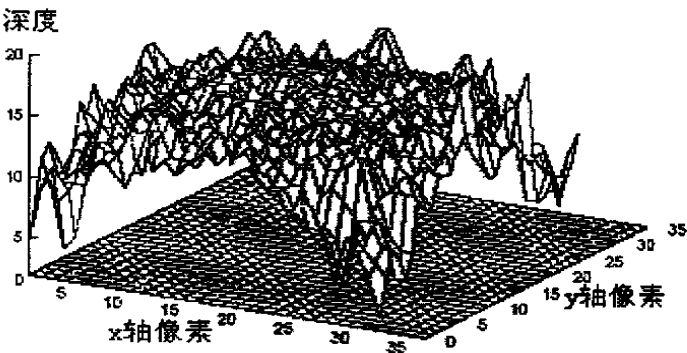


图 4-32 五次迭代规格化对焦图像 FIS

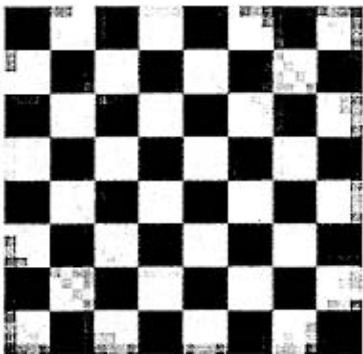


图 4-33 五次迭代规格化对焦图像

IFA	IFA+IDA	五步迭代规格化+STM	五步迭代规格化+插值
7.3%	6.7%	5.3%	11.5%

表 4-5 球状物体每个像素的灰阶百分比误差

比较不同的结果，可以发现使用 STM 获得初始值，然后采用规格化方法迭代要比其他方法来得好。

本文通过几个实验说明了最优化方法用于 IFDA 算法的情况。该算法是以一种最优方式处理数量可变的离焦图像。采用最优化方法，IFDA 将更加有效，因为它以更好的方式利用图像数据且避免了不必要的图像采集和计算。同样，它处理了最有效的数据并且用最适合的方式求解，所以它的结果更精确。实验结果表明由少数离焦图像估计对焦图像(卷积问题)具有一定的困难。未来我们需要进一步研究如何解决这个问题。这将在 IFDA 的性能方面便于进一步的改善。无论如何，如果可以使用的图像不是少数而是多数，则 IFDA 在实际应用中给出有用的好的结果。

4.3 数字图像评价函数

数字图像评价函数是评价数字图像质量的一个客观尺度。它是图像恢复中评价图像质量的一个重要判据；也是采用数字图像处理技术实现自动对焦的一个关键。理想的评价函数应该具有单峰性、无偏性、能反映离焦的极性，同时还应该具备较好的抗干扰能力。目前数字图像评价函数主要有灰度变化函数、梯度函数、图像灰度熵函数和频域类函数四大类。目前，对梯度函数的研究仅应用了图像灰

度差分绝对值之和作为评价函数，且只是对离焦产生的模糊情况进行的研究。

4.3.1 图像灰度梯度向量模方和

对一数字图像 $f(x, y)$ ，其梯度的模为：

$$|\nabla f(x, y)| = [(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2]^{1/2} \quad (4-17)$$

用差分代替微分，则梯度模的近似表达式为：

$$|\nabla f(x, y)| = \{[f(x, y) - f(x+1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y+1)]^2\}^{1/2} \quad (4-18)$$

对于图像序列的第 i ($i=1, 2, \dots, I$)幅图像，在某图像窗口 w 内的灰度梯度向量模的和为 G_i ，灰度梯度向量模方和为 G'_i ，则：

$$G_i = \sum_{x, y \in w} \{[f_i(x, y) - f_i(x+1, y)]^2 + [f_i(x, y) - f_i(x, y+1)]^2\}^{1/2} \quad (4-19)$$

$$G'_i = \sum_{x, y \in w} \{[f_i(x, y) - f_i(x+1, y)]^2 + [f_i(x, y) - f_i(x, y+1)]^2\} \quad (4-20)$$

G_i 或 G'_i 反映了图像序列第 i 幅图像在图像窗口 w 内的灰度变化率大小。一幅图像越模糊，图像中灰度变化率越小， G_i 或 G'_i 越小。图像由模糊变清晰时，图像中的灰度变化率由小变大。最大的 G_i 或 G'_i 对应的图像就是最清晰的图像。

图4-34、4-35分别给出了灰度梯度向量模和与灰度梯度向量模方和。

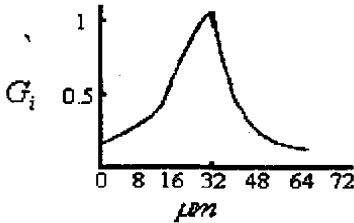


图4-34 灰度梯度向量模和

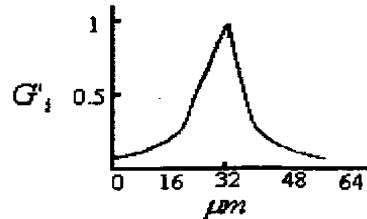


图4-35 灰度梯度向量模方和

由图我们可以看出 G_i 在焦平面附近的变化曲线有明显的峰值，单峰性好，且变化陡峭。因此，图像灰度梯度向量模和是一种较好的评价函数。 G'_i 的变化则曲线更陡，这说明用图像灰度梯度向量模方和作为评价函数，效果将更理想。

4.3.2 Roberts 梯度和

对于 $i=1, 2, \dots, I$ ，考虑到像素的交叉位置关系，可采用Roberts梯度和：

$$R_i = \sum_{(x, y) \in w} \{|f_i(x, y) - f_i(x+1, y+1)| + |f_i(x+1, y) - f_i(x, y+1)|\} \quad (4-21)$$

由图4-36可以看出，对由于离焦产生的图像模糊问题，用Roberts梯度和作为评价

函数与用 G_i 作为评价函数的效果基本一致。

4.3.3 Laplacian (8 邻域微分)算子和

对图像序列的第 i ($i=1,2,\dots,D$)帧图像, 在图像窗口 w 内, 对每个像素在 $3*3$ 邻域中采用Laplacian 算子, 得到8邻域微分值, 然后在 w 内求和, 得:

$$L_i = \sum_{(x,y) \in w} \{ | 8f_i(x,y) - f_i(x,y-1) - f_i(x-1,y) - f_i(x+1,y) - f_i(x,y+1) - f_i(x-1,y-1) - f_i(x-1,y+1) - f_i(x+1,y+1) | \} \quad (4-22)$$

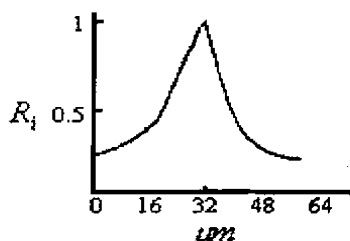


图4-36 Roberts 梯度和

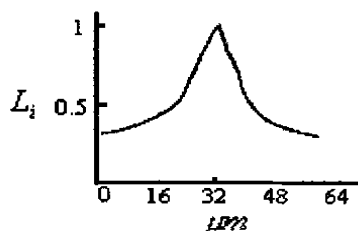


图4-37 Laplacian算子和

对一模糊图像, 在每个像素附近的灰度值变化小, 则 L_i 小。对最清晰图像, 图像的轮廓鲜明, L_i 达到最大值。从图4-37可看出, L_i 在焦平面附近的变化曲线平滑性、对称性、单峰性和灵敏度都很好。Laplacian(8邻域微分)算子和也是一种理想的评价函数。

这里所提出的图像灰度梯度向量模方和、Roberts梯度和与Laplacian(8邻域微分)算子和这三种离焦模糊图像的评价函数, 都具有无偏性好、单峰性强、在焦平面附近变化趋势明显和灵敏度高的特点。它们都可以用作本文图像恢复中评价图像质量的重要判据。本文所选用Laplacian算子和作为评价函数。

4.4 IFDA 算法流程图

本文IFDA算法是根据可变数量的离焦图像重建清晰的图像。下面我们给出实现IFDA的流程图, 如图4-38所示。图4-39则给出了获得初始值的具体步骤。

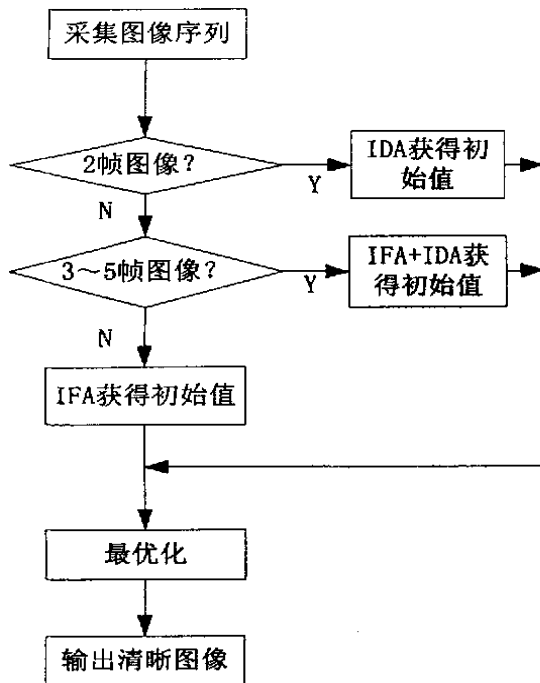


图4-38 IFDA算法流程图

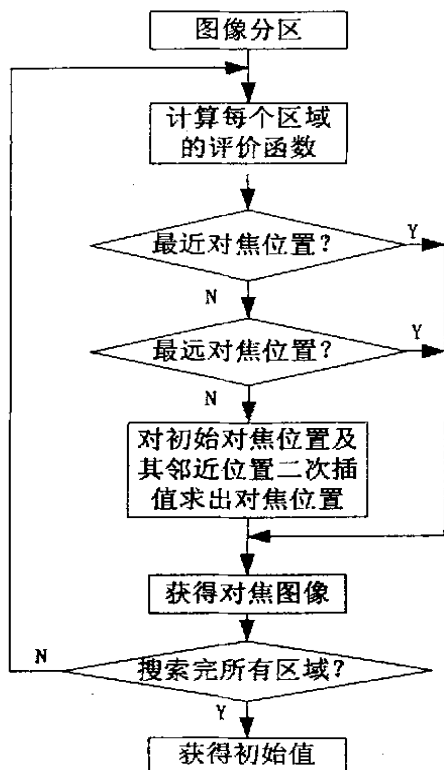


图4-39 计算初始值

4.5 IFDA 算法实现结果

使用计算机仿真 IFDA 算法，结果表明：使用 IFDA 算法重建恢复清晰图像能够得到满意的结果。



模糊图像1

模糊图像2

模糊图像3



模糊图像4



模糊图像5



模糊图像6



根据模糊图像重建的图像

第五章 基于图像处理的自动曝光算法

使用相机拍摄时,一个基本要求就是要掌握恰到好处的曝光,这样才能使拍摄的图像更加完美。对于数码相机来说就是必须在拍摄过程中使图像传感器得到合适的曝光^[1]。自动曝光的主要目的就是计算正确的曝光量,从而使得相机能够拍摄出高质量的照片。

数码相机曝光量的多少由数码相机的光圈系数和快门速度共同给出。数码相机的自动曝光是指数码相机根据自身测光系统的测光结果,自动选定光圈系数、快门速度,从而获得准确的曝光。

5.1 曝光量测试

曝光量是指感光器件在曝光时所受光量的多少。曝光量的大小,取决于在感光器件上的照度的强弱和曝光时间的长短。在数码相机的各个参数中,曝光量无疑是最重要的参数之一。测试曝光量是控制曝光的前提。

5.1.1 曝光参数方程式

相机自动曝光的主要目的是使得感光器件获得正确、合适的曝光量^[69]。这可以从两个方面分析:(1)从相机平面上获得的平均曝光量方面探讨;(2)从感光芯片应该具有的合适曝光量方面探讨。

相机平面上平均曝光量 H_F 为:

$$H_F = ET \quad (5-1)$$

式中 E 为像平面上的平均照度, T 为快门的有效曝光时间。

从相机成像关系可得:

$$E = qL\left(\frac{D}{f}\right)^2 = qL\frac{1}{A^2} \quad (5-2)$$

式中, q 为摄影成像特性系数。它主要由相机结构参数、镜头加工工艺水平以及定标校正值所确定,按美国标准 PH3.49-1971, $q=0.65$; L 为物体亮度(单位为 cd/m^2), A 为摄影物镜光圈数。

如果把 $q=0.65$ 代入等式(5-2), 则 $E = 0.65L\frac{1}{A^2}$ 。

感光器件的合适曝光量由下式表示：

$$H_g = P/S \quad (5-3)$$

式中， S 为以 ISO 表示的感光度(对于数码相机则为相当感光度)； P 为感光器件的合适曝光系数。

等式(5-1)与(5-3)是从两个不同的角度来分析合理曝光量的，而相机要得到正确、合适的曝光量，就要使得两者相等，即 $H_F = H_g$ 。从而：

$$qL \frac{1}{A^2} = \frac{P}{S} \quad (5-4)$$

移项简化，得：

$$\frac{A^2}{T} = \frac{LS}{P/q} = \frac{LS}{K} \quad (5-5)$$

等式(5-5)即为相机曝光控制的基本参数方程式，方程左边为相机结构参数 A 、 T ，右边为使用条件，即物体亮度 L 和感光度 S 。该方程式通过曝光校正常数 K 把两者结合起来，成为自动曝光相机和曝光表设计、计算的基本方程式。

但在实际应用中，等式(5-5)所表示的曝光控制基本参数方程式的使用十分繁琐和不变，而且不够直观，因此我们引入 APEX 系统来简化该方程式。

5.1.2 APEX 系统

在美国标准和中国国家标准中，将等式(5-5)所表示的曝光控制基本参数方程式进行了变换，将它表示为以 2 为底的指数形式，也就是以加法的形式来表达曝光参数方程式，故称为加法系统，即 APEX(Additive System of Photographic Exposure)系统^[70]。AV，TV，BV，SV 各数值在数量上变化 1，则相当于原来曝光参数 A ， T ， S ， L 变化一倍。

“TV”为快门有效曝光时间值，它与有效曝光时间 T 的数值关系为：

$$2^{TV} = \frac{1}{T}, \quad TV = \log_2(1/T) \quad (5-6)$$

“AV”为光圈数值，它与镜头光圈数的关系为：

$$2^{AV} = A^2, \quad AV = \log_2 A^2 \quad (5-7)$$

“SV”为胶片速度值，它与 ISO 感光速度 S_x 的关系为：

$$2^{SV} = 0.3S_x, \quad SV = \log_2 0.3S_x \quad (5-8)$$

“BV”为光亮度值，它与过去亮度L的关系为：

$$2^{BV} = \frac{L}{0.3K}, \quad BV = \log_2(L/0.3K) \quad (5-9)$$

在上面 APEX 系统变换中，采用以 2 为底的指数，这样每相差一档数值，就反映量值增减一倍，这样的替代比较合理、直观，数值也简便。同样将方程式也表示为以 2 为底的形式，则变为：

$$\frac{A^2}{T} = 2^{EV} = \frac{LS}{K} \quad (5-10)$$

$$2^{AV} 2^{TV} = 2^{EV} = 2^{BV} 2^{SV} \quad (5-11)$$

$$AV + TV = EV = BV + SV \quad (5-12)$$

EV 称为曝光值，它并不代表被摄物的亮度，它只反映了光圈和快门曝光时间的组合，它是曝光单位，不是亮度单位。它也不是图像传感器的曝光量，而是为了使图像传感器维持一定的曝光量，光圈和快门的控制量值。图 5-1 给出了自动曝光的运算处理框图。

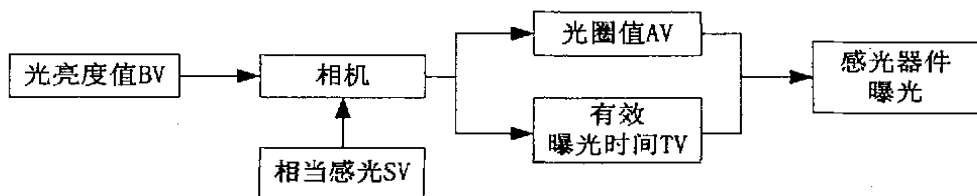


图 5-1 自动曝光运算处理框图

根据图 5-1，我们可以看出曝光运算处理的过程就是相机自动曝光系统的测光器件测得亮度值 BV，并根据相当感光度值 SV 求得曝光值，再由曝光值 EV 根据拍摄需要确定合适的曝光组合——光圈数和快门速度进行曝光，这就是我们所研究的自动曝光。

自动曝光可以分为很多种类。可以优先选定光圈再由数码相机自动选择快门速度，称为光圈优先自动曝光；也可以优先选定快门速度再由数码相机自动选择光圈系数，称为快门优先自动曝光；还有一种就是完全由数码相机自动选择光圈系数和快门速度，称为程序自动曝光。本文所研究的自动曝光就是一种程序自动曝光。当然，不同的数码相机，其程序自动曝光的“程序”不同。

5.2 传统的自动曝光控制方法

最早的数码相机自动曝光是由图像传感器(Image Sensor, 简称 IS)实现的。

如图 5-2 所示, 图像传感器内部主要由像素阵列、模拟信号处理器和控制器三个部分组成。像素阵列负责曝光成像, 模拟信号处理器处理信号的放大、滤波和 A/D 转换^[18]。

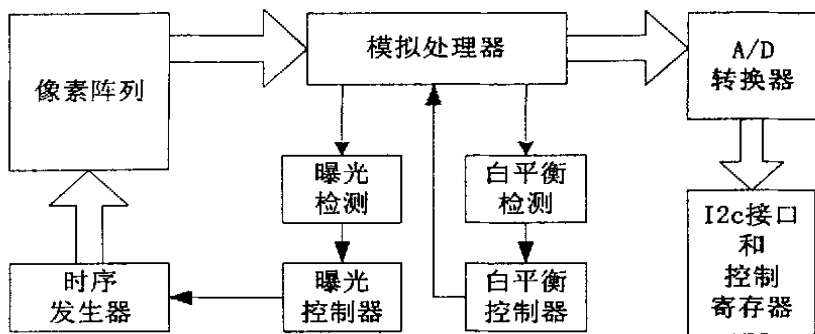


图 5-2 图像传感器内部结构功能

对于图像传感器的传统自动控制器, 我们按其功能模块进行介绍。

5.2.1 自动曝光控制 AEC

自动曝光控制 AEC 是 Automatic Exposure Control 的简称。

一、IS 曝光原理

IS 器件的曝光是利用在 PN 结上加上反偏电压, 经光照激发光电子, 产生漏电流的原理进行工作。CMOS IS 器件是利用电容存储光电子。CCD IS 器件则是通过势阱完成电荷耦合的。

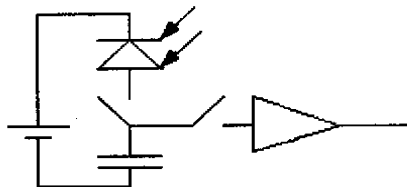


图 5-3 CMOS 图像传感器工作原理

二、电子快门

电子快门的开启就是在 PN 结上加上反偏电压。CCD IS 器件的电子快门关闭是将曝光后的光电子同步转移到缓冲区后, 逐行移出, 再通过读出放大器读出; 而 CMOS IS 器件则是将其反偏电压断开, 并将电容中存储的电荷直接通过读出

放大器读出。

三、曝光时间

曝光时间 $T = T_{\text{line}} \cdot \text{AEC}$, $T_{\text{line}} = 63.5\mu\text{s}$ (如果 IS 芯片外接的主时钟为 27Mhz)。AEC 为 IS 内部寄存器, 取值范围从 0~255。

四、自动曝光控制

传统 IS 自动曝光控制器比较简单, 通过设立两个门限值 ECW, ECB 对曝光时间进行调整。具体方法是: 对于感光图像 I 中每个像素点的亮度值 $b_i (i \in I)$ 按照公式(5-13)进行计数统计。

$$\begin{cases} \text{Cnt}_{\text{ECW}} = \sum \text{TRUE}(b_i > L_{\text{Bright}}) \forall i \in I \\ \text{Cnt}_{\text{ECB}} = \sum \text{TRUE}(b_i < L_{\text{Bright}}) \forall i \in I \end{cases} \quad (5-13)$$

式中, $\text{TRUE}(\text{condition}) = \begin{cases} 1: \text{if } _ \text{condition} = \text{true} \\ 0: \text{if } _ \text{condition} = \text{false} \end{cases}$

L_{Bright} 为所规定的亮和暗的分界门限值, 一般取显示亮度灰阶动态范围的中心点。当 $\text{Cnt}_{\text{ECW}} > \text{ECW}$ 或 $\text{Cnt}_{\text{ECB}} > \text{ECB}$ 时, 控制器就自动进行曝光时间的调整, 当感光图像的亮点数超过 ECW 时, 将减少曝光时间, 当感光图像的暗点数超过 ECB 时, 将增加曝光时间; 当 $\text{Cnt}_{\text{ECW}} \leq \text{ECW}$ 且 $\text{Cnt}_{\text{ECB}} \leq \text{ECB}$ 时, 控制器处于稳定状态。实际上这是一种取平均亮度的自动曝光模式。

5.2.2 自动增益控制

IS 的内部增益放大器, 共有两级。第一级是可变增益放大器, 第二级由两个 2 倍增益的放大器组成。在暗环境中拍摄图像时, 为了保证图像的亮度和色彩并降低图像噪声, 通常要使用第二级固定增益放大器。

自动增益控制: 处理方法与自动曝光处理相同, 同样受门限值 ECW, ECB 的控制。由于增益放大器工作时会将噪声连同有效信号一起放大, 因此控制器采用优先设定放大器增益、调节曝光的方法, 以提高系统的信噪比。这里的处理方法类似于传统相机的“光圈优先”曝光法。

5.2.3 直流亮度调节

图像传感器输出图像的亮度取决于系统的增益, 被摄物的照度和曝光时间。

直流亮度控制着图像传感器 RGB 通道的直流偏置, 其数值变化区间为 $[0, 255]$, 对应的直流电平为 $-100\text{mV} \sim +100\text{mV}$ 。该控制参数直接影响了输出图像的平均亮度, 但它是通过改变图像传感器黑电平为目的的控制量, 改变该参数会直接影响传感器的曝光动态范围, 通常将该参数设定为中心值(即 128), 以获得传感器曝光的最大动态范围。

从以上的控制功能我们可以看出, IS 的控制系统各个功能之间的关系是相互独立的, 而提出的控制方法过于简单, 效率较低。实际上, 最终输出的图像与各个控制模块之间的关系是紧密相连的, 各个功能模块之间的关系也是相辅相成的。因此, 仅仅依靠 IS 实现自动曝光是远远不够的, 需要效率更高的控制方法用于实现自动曝光。

5.2.4 基于参照亮度的自动曝光控制方法

根据等式(5-12), 我们可以看出如果数码相机的相当感光度已知, 则曝光值就是关于光亮度值的函数, 并且每一个亮度值对应于且只对应于一个合适的曝光值。如果预先设定参照亮度值, 并给出与该参照亮度值相对应的曝光值, 这样就可以控制数码相机的曝光。这就需要在数码相机内部设置与参照亮度相对应的曝光值查询表格。拍摄时由数码相机的测光系统测得被摄景物的亮度值, 在曝光值查询表格中找到与之对应的曝光值, 根据该曝光值控制光圈系数和快门速度就可以实现自动曝光。

可以使用测光计或者其他光电设备测量参照亮度值, 也可以通过处理图像来设定参照亮度值。将图像分割成许多的子图像, 每一块子图像的平均亮度用于设置参照亮度值。该参照亮度值可以通过调整光圈大小获得^[9], 当然也可以通过设置快门速度获得^[10]。

5.2.5 不同光照条件下的自动曝光控制方法

摄影中被摄景物总是处于一定的光照条件之中, 不同的光照条件下拍摄效果不同。处于明亮环境中的被摄景物, 受到环境反射光的照度比较大; 处于暗淡环境中的被摄景物, 受到环境反射光的照度比较小。可以研究不同光照条件下的亮度值与曝光值之间的函数关系进行曝光控制^{[11][12][13]}。这就需要在数码相机内部设置一个数据库, 用来存储不同光照条件下拍摄的不同类型的照片, 以便拍摄时

数码相机对比参照。

由于基于图像传感器 IS 的自动曝光控制方法过于简单,效率过低;基于参照亮度的自动曝光控制方法由于测光方式的不同所给的参照亮度也有所不同,这就使得曝光不够准确;而不同光照条件下的自动曝光控制方法虽然曝光比较准确,但是却需要采集大量的不同光照条件下拍摄的不同类型的照片,这就使得自动曝光控制的效率不够。为了解决这些问题,本文提出了一种新的基于图像处理的自动曝光算法,该算法使用 BP 神经网络计算图像的合适曝光量。

5.3 基于图像处理的自动曝光算法

一般地,在使用数码相机拍摄之前,总是预先设定好合适的相当感光度。根据等式(5-12),如果相当感光度已知,则曝光值 EV 就是关于亮度值 BV 的函数,即 $EV=f(BV)$ 。自动曝光的控制就是要找出亮度值 BV 与曝光值 EV 之间的函数关系,也就是如何定义函数 f 。

在研究自动曝光算法之前,我们需要了解自动曝光系统的结构。图 5-4 给出了典型的自动曝光系统的结构框图。自动曝光系统工作过程是:(1)采集 CCD 原始图像;(2)微处理器分析处理该图像,得到它的曝光量;(3)根据该图像曝光量驱动快门和光圈。

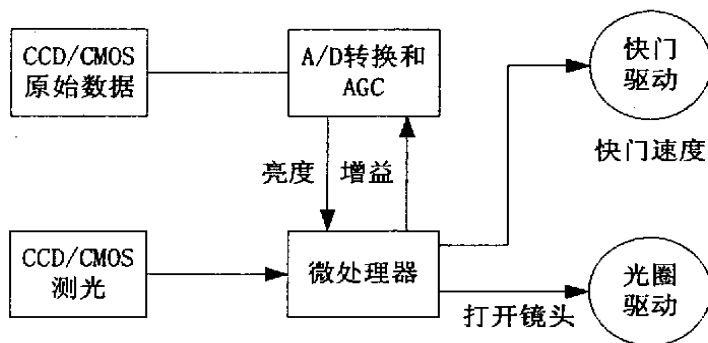


图 5-4 自动曝光系统结构

在本文第二章中我们提过,光圈就是在曝光时利用其进光孔来控制到达数码相机感光芯片上的光线照度强弱的装置,它位于数码相机镜头内部。镜头里的光圈除了控制进光照度进而控制进光量之外,还可以控制成像质量和所拍摄影像的景深。快门则是利用其开启时间的长短控制进光时间,进而控制进光量(曝光量),因而进光量为进光时间与光线照度的乘积。

5.3.1 测光

测光系统是相机的必要组成部分，测光是相机曝光准确的必要条件，只有测光准确才能保证相机曝光准确。

测光是现代摄影技术的重要环节。数码相机通常使用硫化镉光敏电阻 CdS 或者硅光电池 SPD 等测光元件进行测光^{[66][67]}，并且不同相机的测光区域也有所不同。本文我们不再使用这些测光元件，而是直接使用 CCD/CMOS 图像传感器进行测光，这是因为 CCD/CMOS 图像传感器本身就是很好的测光元件。所以在研究数码相机曝光的过程中，不再需要使用额外的测光元件就能够达到测光的目的，这样还有一个好处就是可以降低数码相机的生产成本。本文基于图像处理的自动曝光算法用于数码相机时，所分析的图像就是数码相机 LCD 液晶取景器上所显示的图像。由数码相机内部的数字信号处理器 AT76C113 运用自动曝光算法直接分析处理该图像，就可以获得该图像的最佳曝光值，并根据该曝光值选择合适的曝光时间，从而拍摄出最佳的与该图像相对应的照片。

5.3.2 图像分析

图像分析包括两个部分：(1)将图像划分成不同的区域；(2)大略分析每个区域，应用这些区域的图像亮度信息计算整个图像符合实际情况的准确曝光量。本文自动曝光算法中，图像的划分如图 5-5 所示。如果预先设置好相机的光圈系数值，则根据计算的曝光值就可以很容易求出得到该曝光值所需要的曝光时间。

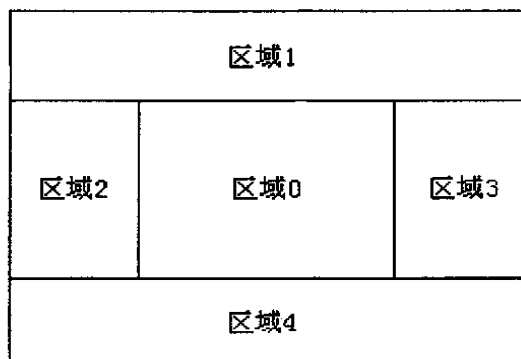


图 5-5 图像区域的划分

如图 5-5 所示，将图像分成五个区域。这样划分图像是为了使得该自动曝光算法适用于风景照、人物照等不同类型的照片，这是由于不同类型的照片所需要

的曝光重点不一样。

每个图像区域的直方图决定了各自区域亮度的平均值、偏差、最小值以及最大值。亮度的平均值与平均亮度和对比度有关，对比度则是用于测定图像清晰度的。本文我们通过设计一个 BP 神经网络^[14]模块来根据图像直方图给出的亮度信息求出该图像的合适曝光量。如果在拍摄之前人为设置好光圈系数，则根据该曝光量可以很容易得到合适的曝光时间。

本文自动曝光算法分析处理的图像是数码相机 LCD 液晶取景器上所显示的图像。如果已经求出了该图像所对应的曝光量，则根据该曝光量确定相应的曝光时间就能够得到符合拍摄要求的图像。

5.4 BP 神经网络应用

神经网络是一种包括不同层次处理单元的结构体。这些处理单元构成了通过学习事例来实现非线性关系的正确工具。这种研究是通过改变处理单元之间的连接权值来实现的。

目前，在人工神经网络的实际应用中，绝大部分的神经网络模型是采用 BP 网络(误差反向传播训练算法)及其变化形式，它是前向网络的核心部分，并体现了人工神经网络最精华的部分。BP 网络主要应用于^[15]：

- 函数逼近：用输入矢量和相应的输出矢量训练一个网络逼近一个函数。
- 模式识别：用一个特定的输出矢量将它与输入矢量联系起来。
- 分类：把输入矢量以所定义的合适方式进行分类。
- 数据压缩：减少输出矢量维数以便传输或存储。

本文自动曝光算法中，曝光值 EV 与图像亮度值 BV 之间存在着一种非线性关系，即曝光值 EV 是关于图像亮度值 BV 的函数： $EV=f(BV)$ 。我们算法的目的就是求出该非线性函数 f 。

在 BP 神经网络模型中，给出输入——输出向量对 (x, t) ，调整神经元之间的权值关系，使得总均方误差(Total-mean-squared-error) $TMSE$ 最小：

$$TMSE = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^M (t_j^{(q)} - y_j^{(q)})^2 \quad (5-14)$$

式中 Q 表示事例个数， M 为输出向量的个数， y_j 是第 j 维神经元的输出量。当总均方误差达到最小时，BP 神经网络结束训练过程。

BP 神经网络的图像处理的模型通常采用三层神经元的结构，即第一层为输入神经元，第二层为隐含层神经元，第三层为输出层神经元。为了降低训练误差提高训练精度，通常可以通过增加神经网络的层数来实现，但是这也会使得神经网络变得更为复杂，并且增加了网络的训练时间。实际应用过程中，误差精度的提高也可以通过增加隐含层中的神经元数目来获得，而且训练效果也比要增加层数更容易观察和调整。所以在一般情况下，我们优先考虑隐含层中的神经元数。神经网络训练精度的提高，可以通过采用一个隐含层而增加它的神经元数目来获得。因此本文使用的 BP 神经网络中，只含有一个隐含层。

图 5-6 给出了本文使用 BP 神经网络的情况。图像划分成图 5-5 所示，将图像每个子区域的亮度参数作为 BP 神经网络的输入神经元，也就是图像每个区域的平均亮度值、亮度偏差、亮度最小值以及亮度最大值作为神经网络的输入单元，则神经网络的输入元数量为 $5 \times 4 = 20$ 。根据在实际中通过大量的仿真和探索，我们最终确定了决定总均方误差 $TMSE$ 的隐含层神经元个数。我们所采用的神经网络隐含层中共有 20 个处理单元。输出神经元的个数取决于训练神经网络所得到的曝光值。根据我们采集的图像，它们曝光值从 6 变到 9，如果以 $1/3$ 为步长，则从 6 变到 9 就有 10 个不同的值，因此神经网络的输出元数量选为 10。

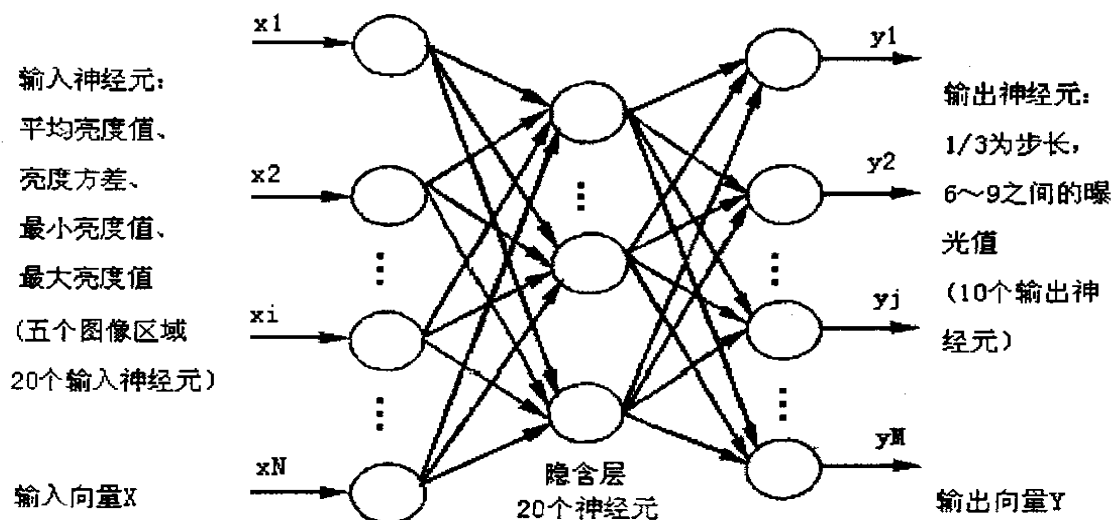


图 5-6 BP 神经网络的应用

在图 5-6 中，将输入神经元记为： $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ ($N=20$)；隐含层神经元为 $h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_H$ ($H=20$)；输出神经元为 y_1, y_2, \dots, y_M ($M=10$)；输入层节点 x_i 与隐含层节点 h_k 之间的连接权值记为 w_{1k} ；隐含层节点 h_k 与输出层节点 y_j 之间

的权值记为 w_{2jk} 。如果输出层节点的阈值为 0，则输出为 $y_k = g(\sum_{j=1}^H w_{2jk} h_j)$ ，

$k=1,2,\dots,M$ 。隐含层节点的输出为 $h_j = \sigma(\sum_{i=1}^N w_{1ij} x_i + w_j^T)$ ， $j=1,2,\dots,H$ ， w_j^T 为第 j

个隐含层节点的阈值。

输出层和隐含层的激励函数均使用 Sigmoid 函数 $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ ；使用等式 (5-14) 计算总均方误差。

隐含层——输出层权值变化量为：

$$\Delta W = \frac{\partial e}{\partial w_{jk}} = (d_k - y_k(W)) y_k(W) (1 - y_k(W)) h_j(W) \quad (5-15)$$

输入层——隐含层权值变化量为：

$$\Delta W = \frac{\partial e}{\partial w_{ij}} = (d_k - y_k(W)) y_k(W) (1 - y_k(W)) \left\{ \sum_{j=1}^H w_{2jk} \frac{\partial h_j}{\partial w_{ij}} \right\} \quad (5-16)$$

式中， $\frac{\partial h_j}{\partial w_{ij}} = h_j (1 - h_j) x_i$ 。

求出权值变化量之后，可以根据 $e(W)$ 修正权值 W ， $\text{new } W = \text{old } W + \lambda * \Delta W$ ， λ 为学习速率。

图 5-7 给出了实现 BP 算法的流程图，BP 算法由两个部分组成：正向传播和误差反向传播。在正向传播过程中，每层神经元的状态只会影响到下一层神经网络。如果输出层不能得到期望输出，则转入反向传播过程，将误差信号沿原来的连接通路返回，通过修改各层神经元的权值，逐次向输入层传播去进行计算，再经过原来的连接通路返回，两个过程反复运用，知道误差信号最小。

图 5-8 则给出了本文自动曝光系统应用 BP 神经网络的程序逻辑框图。首先进行初始化，初始化进程包括设定初始权值、阈值，设置好相应的输入文件、隐含层和输出神经元数目，确定学习速率以及拟定精度等，再进行图像分析，去除指标集合中多余的指标，然后就可以利用 BP 算法对神经网络进行训练，训练完毕后，将神经网络存储起来(主要是存储相邻层各节点之间的连接权值以及各自的阈值)。这样，就可以使用该 BP 神经网络了。

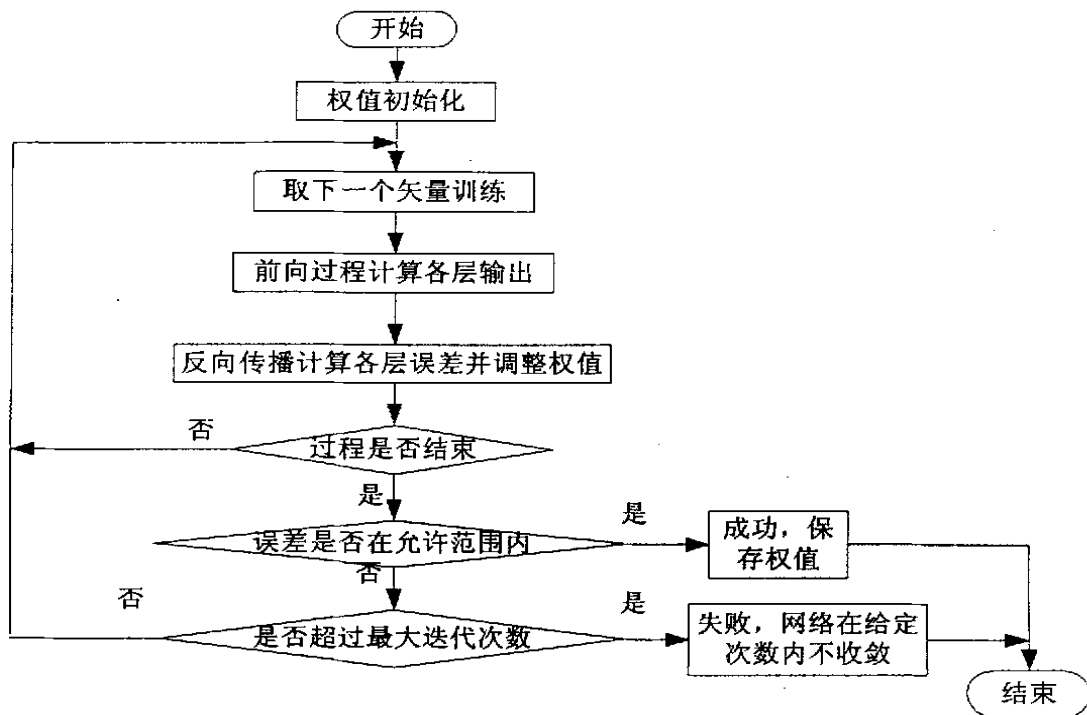


图 5-7 BP 算法流程图

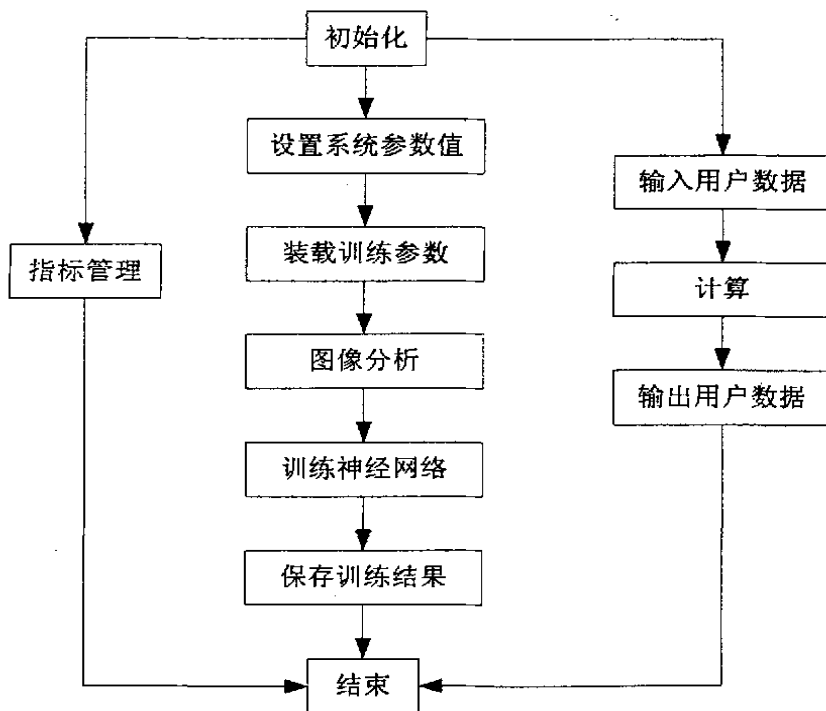


图 5-8 程序逻辑流程图

下面我们给出部分神经网络设计的程序代码。

一、计算隐含层各神经元的输入 $s(j)$ 和输出 $h(j)$

```
Dim s(19) As Double
Dim h(19) As Double
for j=0 to 19
    for i=0 to 19
         $s(j)=s(j)+w1(i,j,0)*x(i)-\theta(j,0);$ 
         $i=i+1;$ 
         $h(j)=1/(1+\exp(-s(j)));$ 
    next i
next j
```

二、计算输出层各神经元的输入 $p(k)$ 和输出 $c(k)$

```
Dim p(9) As Double
Dim y(9) As Double
for k=0 to 9
    for j=0 to 19
         $p(k)=p(k)+w2(j,k,0)*h(j)-r(k,0);$ 
         $j=j+1;$ 
         $c(k)=1/(1+\exp(-p(k)));$ 
    next j
next k
```

三、计算各层误差及总误差平方和 $TMSE$

期望输出与实际输出偏差为 $\delta(k)$ ，校正偏差为 $d(k)$ ，隐含层校正偏差为 $e(j)$

```
Dim  $\delta$ (9) As Double
Dim e(19) As Double
Dim d(9) As Double
for k=0 to 9
```

```

d(k)=(y(k)-c(k))*c(k)*(1-c(k));
    for j=0 to 19
        e(j)=e(j)+d(k)*w2(j,k,0)*h(j)*(1-h(j));
    next j
    k=k+1;
next k

```

四、计算输出网络的新权值 $w2(j,k,n+1)$ 和输出层的新阈值

```

for j=0 to 19
    for k=0 to 9
        w2(j,k,1)=w2(j,k,0)+ $\alpha$ *d(k)*h(j);
        r(k,1)=r(k,0)+ $\alpha$ *d(k);
        w2(j,k,0)=w2(j,k,1);
        r(k,0)=r(k,1);
    next k
next j

```

五、计算网络隐含层的新权值 $w1(i,j,n+1)$ 及隐含层的新阈值

```

for i=0 to 19
    for j=0 to 19
        w1(i,j,1)=w1(i,j,0)+ $\beta$ *e(j)*x(0,i);
         $\theta(j,1)=\theta(j,0)+\beta$ *e(j);
        w1(i,j,0)=w1(i,j,1);
         $\theta(j,0)=\theta(j,1)$ ;
    next j
next i

```

本文我们设计的基于图像处理的自动曝光系统程序主界面如图 5-12 所示：

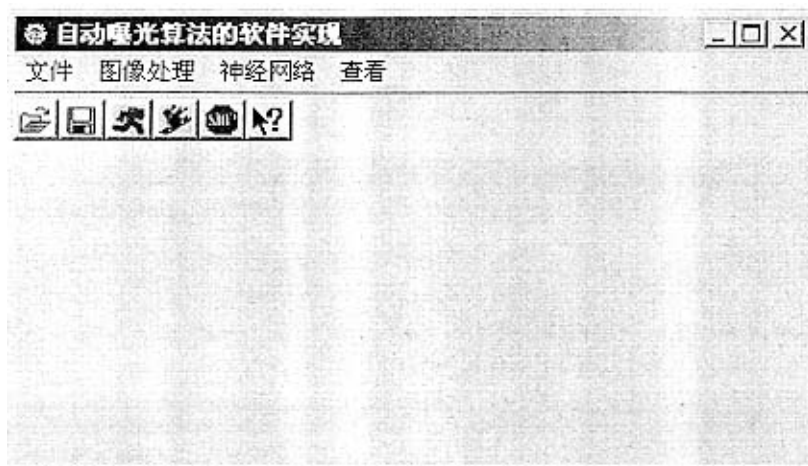



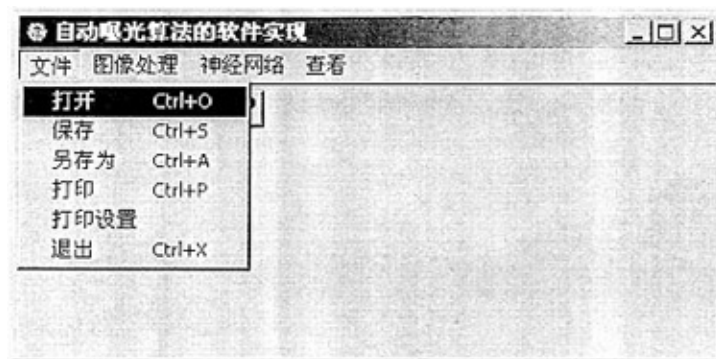


图 5-12

我们所有的操作都是在图 5-12 所示的程序主界面上完成的。

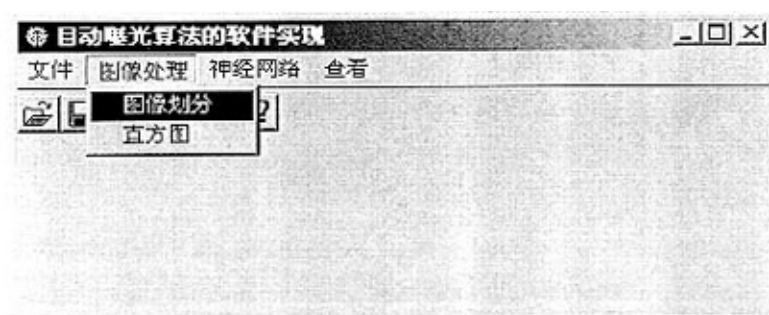
点击按钮  用来训练神经网络；点击按钮  可以查看神经网络的训练状态；点击按钮  则停止神经网络的训练。

首先打开图像文件：



打开图像文件之后，就要图像划分区域，求出其每个区域的直方图，再根据

这些直方图求出每个图像区域的亮度信息。



区域 1



区域 2



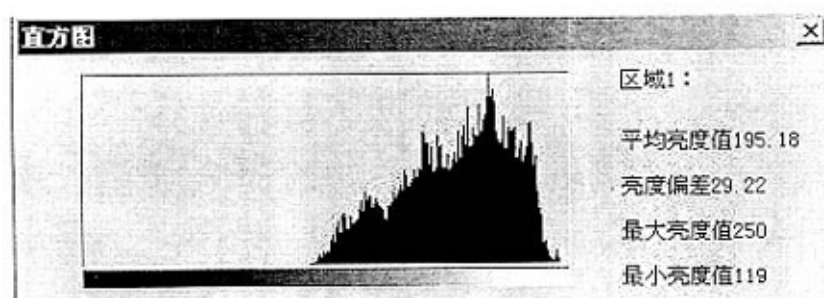
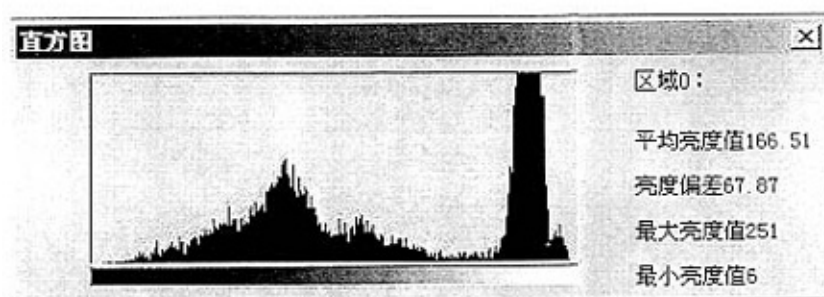
区域 0

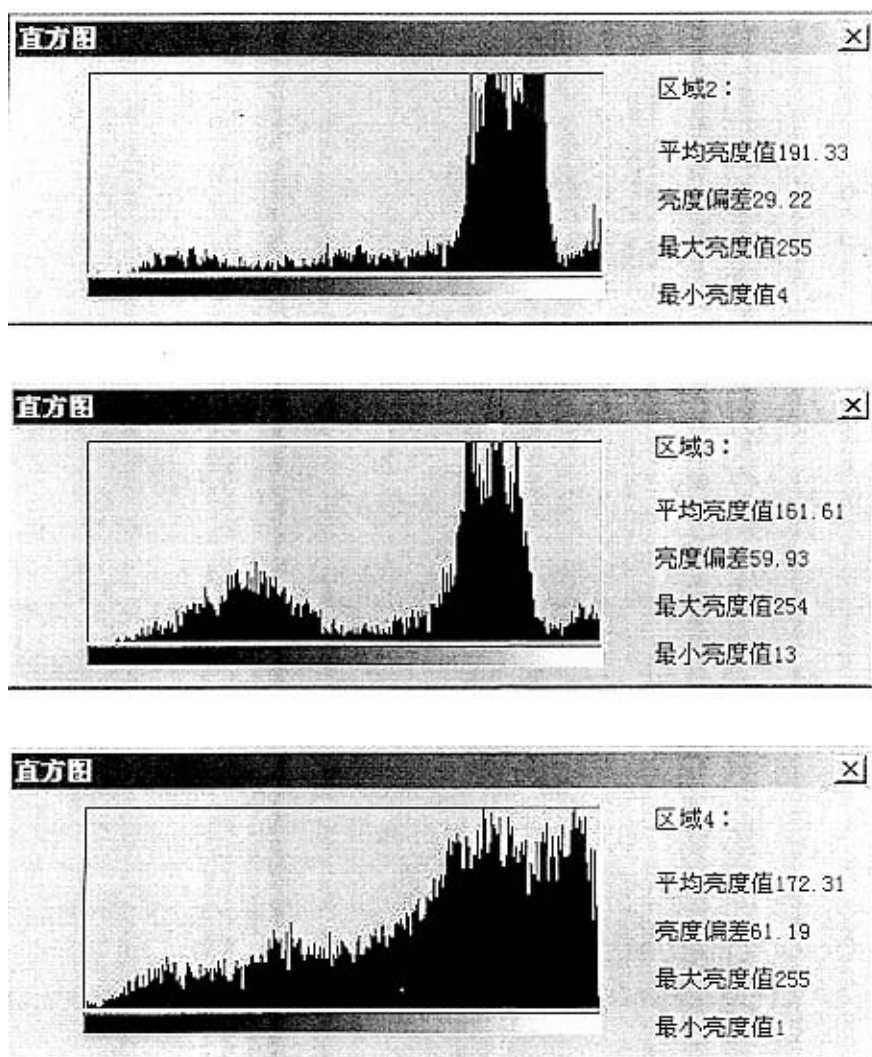


区域 3

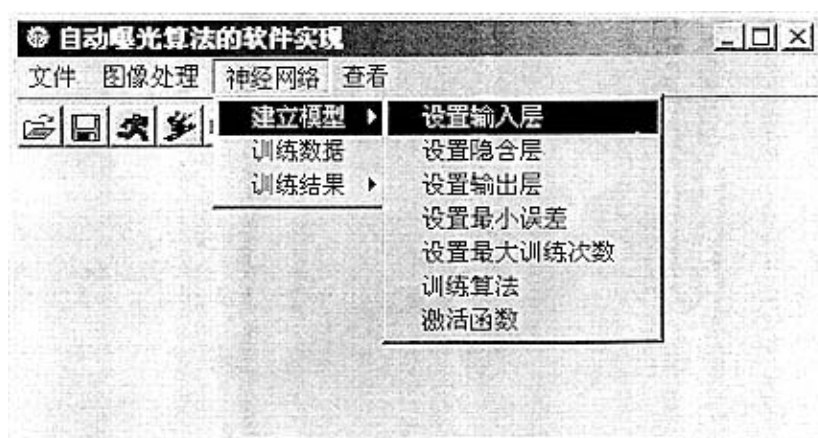


区域 4

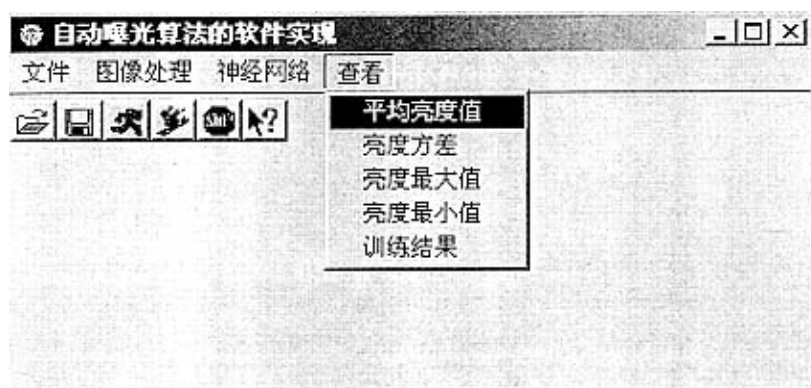




有了图像的亮度信息，我们就可以训练神经网络了。



当然，在整个软件实现过程中，我们可以查看图像的亮度信息以及神经网络的训练状态。



使用神经网络训练出的该图像合适曝光值为 7.67。

图 5-13 给出了数码相机自动曝光系统从接收图像到最终完成自动曝光的整个过程。

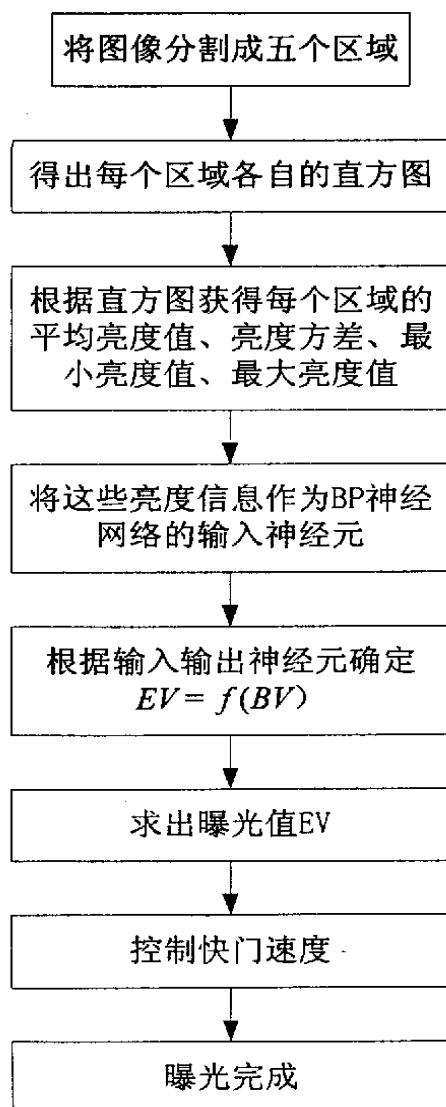


图 5-13 自动曝光系统实现框图

5.5 曝光调整

大多数图像都是根据中性灰或者 18% 的反光率来获得合适的曝光值。然而，如果景物中有着大面积的白雪或是沙滩，根据中性灰所得到的曝光值就会过亮或者过暗。在这种情况下，根据中性灰所获得的曝光值就不正确。这就是为什么一些相机具有手动曝光补偿的原因。还有就是如果景物中既有很亮的区域又有很暗的区域，则很难获得合适的曝光量，这也要求适当的曝光调整^[63]。

数码相机可能同时有着多种测光方式，但是每种测光方式都存在着一定的局限性，总存在着可能测光失准的拍摄条件。因为数码相机的测光系统只能测出被摄物的亮度、反差以及根据自动对焦系统所获取的信息了解物体的位置信息，但是对于被摄物的质地、反光率高低等都无法判断。所以在光线复杂的拍摄条件下，自动曝光就隐藏着“欺骗”性。一般来说，景物亮度对比越小，曝光越准确，反之则偏差加大。传统相机的胶片宽容度比较大，所以曝光偏差在一定范围内不会有大问题。但是 CCD/CMOS 宽容度比较小，较小的曝光偏差都可能影响整体的效果，这就更加需要曝光调整。同样，基于图像处理的自动曝光算法也存在着这样的局限性。这就要求使用测光锁定、曝光补偿等相机辅助功能^[63]，从而达到较为精确的曝光。

5.6 自动曝光算法的实现结果

本文在使用 BP 神经网络训练的过程中，我们采集了 60 幅图像。这些图像包含了 300 个直方图。将该自动曝光算法应用于镇江江奎集团所生产的数码相机 DC3300Z 中，结果表明：60 幅图像中，偏离正确曝光的比率为 5%。



风景照

第六章 结论与展望

本文我们在研究 IFA 和 IDA 的基础上,提出了一种新的根据可变数量的离焦图像重建恢复清晰图像的算法:IFDA;同时提出使用 BP 神经网络训练函数来计算图像的合适曝光量,然后根据该曝光量设定相应的快门速度和光圈系数,从而控制数码相机的曝光。

通过连接 IFA 和 IDA 图像数据的未知量个数和限制条件形成 IFDA 理论。IFDA 通过建立相机 PSF 模型来精确模拟实际的相机系统。本文设计 IFDA 的目的在于求得比 IFA 和 IDA 更为精确的结果,本文通过在 IFDA 算法中使用规格化方法来处理可变数量的图像来实现这一目的。此外,三维外形和对焦图像的重建问题可以看成是最优化问题,也就是最小化估计图像和所获图像之间的误差。本文介绍了三种最优化方法,即梯度下降法(SPS, PPS, SPPS)、局部搜索法以及规格化方法。实际应用中应该根据物体平滑度不同以及每种最优化方法的特性,合理使用各种方法。

本文我们研究的 IFDA 算法的主要目的在于通过分析离焦图像恢复三维外形和对焦图像。在未来的研究中,我们应该着重于开发一种计算速度更快、计算结果更精确的最优化方法用于 IFDA 算法中去。

可以考虑将最小化动态的局部误差来提高估计图像的精确度,这样可以减少计算时间提高计算速度。动态局部误差的意思就是只在一定模糊范围内获得观察图像,这样可以避免在整个模糊范围内所带来的边缘效应。这样,可以很容易提高计算效率而不必牺牲计算精度。当然也可以考虑重新研究一种新的方法使用动态局部误差。

还有一种可能就是研究出一种更佳的最优化方法应用到 IFDA 算法中去,从而减少计算量并且提高计算精度。比如,我们可以在 IFDA 的不同方面使用 Bayesian 判据或者模拟退火来改善优化结果,而不再使用本文所说的最优化方法。

将图像划分区域,将这些图像区域的亮度信息应用到 BP 神经网络中去,可以求出该图像的曝光值。如果光圈系数已经预先设定好,则根据该曝光值可以得到拍摄出优质的照片所需要的合适曝光时间,从而控制曝光。

但是，由于 BP 算法中误差反向传播时，误差从输出层传回输入层，所有权值同时改变，这样会使网络的记忆和归纳能力下降，从而影响曝光精度。我们可以考虑采用改进的 BP 算法来解决这个问题。即：分别优化输出层和隐含层的权值，而不同时修改。分别优化每层的权值会使得整个学习过程简单而实用；同时，将每层优化为一个线性问题可以提高 BP 算法的精度。

我们知道，数码相机中，控制所成图像质量的参数主要有三个：曝光、对焦以及白平衡。本文我们只研究了其中的自动对焦和自动曝光，未来我们还需要继续研究自动白平衡的情况。只有控制好这三个参数，才能使得数码相机能够拍摄出高质量的图像。

致 谢

本论文是在我的导师李正明教授的推荐下，在镇江江奎集团完成的。李老师渊博的学识和丰富的实践经验，严谨求实的治学态度，一丝不苟的工作作风和谦虚高尚的人格品德给我留下了及其深刻的印象，将永远是我学习的榜样。三年来，李老师对学生言传身教、精心指导，倾注了大量的心血。在完成论文之际，我谨向导师表示衷心的感谢，感谢他几年来对我的关怀与教诲。

感谢镇江江奎集团的李峰博士在论文进行过程中给予我热心的指导和大量的建议。感谢陈永刚工程师在课题实验工作过程中对我的各种帮助和支持。这些都是我的论文得以顺利进行的基础。在他们的谆谆教导和亲切关怀下，使我顺利的完成了课题工作。

我要衷心地感谢我的父母亲，是他们多年来无私的关怀，谆谆的教诲使得我一步步得到成长。我还要特别感谢我的男友施凯，他在生活上所给予无微不至的关怀及工作上的倾心支持是我前进的动力。

三年的生活和学习期间，孙俊、许波、周祥、徐义翔、刘冬明、陈娇、夏爱玲等师兄、师姐和师妹们，都给予我热情帮助、鼓励和启发，使我受益不浅，在此一并表示感谢。

最后感谢各位专家教授在百忙中对本文的审阅和赐教！

参 考 文 献

- 【1】 朱信诚, 吕俊怀, 数码相机与图像处理, 第一版, 北京: 金盾出版社, 2001.11: pp
- 【2】 张问骅, 自动对焦(1), 自动化博览, 1995 年第 5 期: pp10-15
- 【3】 俞宙, 刘煜, 用好数码相机, 第一版, 北京: 中国水利水电出版社, 2001.6: pp
- 【4】 吕强, 数码摄影之对焦, 电子世界, 2004 年第 9 期: pp14-15
- 【5】 李葳芳, 单反相机的自动对焦技术, 现代照相机, 2000 年第 5 期
- 【6】 郑玉珍, 吴勇, 倪旭翔, 实时自动对焦的研究, 光电工程, 2004 年第 31 卷第 4 期: pp64-66
- 【7】 Nitin Sampat, Shyam Venkataraman, Thomas Yeh and Robert Kremens, System Implications of Implementing Auto-Exposure on Consumer Digital Cameras, Part of IS&T/ SPIE Conference on sensors, Cameras, and Applications for Digital Photography, vol. 3650, 1999: pp100-107
- 【8】 June- Sok Lee, You- Young Jung, Byung- Soo Kim and Sung- Jea Ko, An Advanced Video Camera System with Robust AF, AE, and AWB Control, Senior Member, IEEE
- 【9】 T. Mori, Automatic exposure control apparatus, US Patent: 5703644, 1997.12.30
- 【10】 M. Cho, S-G Lee and B-D Nam, The fast auto exposure algorithm based on the numerical analysis, Proceedings of the SPIE Conference on Sensors, Cameras, and Applications for Digital Photography, vol. 3650, 1999
- 【11】 T. Takagi, Automatic exposure device and photometry device in a camera, US Patent: 4984006, 1997.9.2
- 【12】 H. Fustii, etc, Automatic exposure controlling device for a camera, US Patent: 5452047, 1995.9.19
- 【13】 N. Sampat, Shyam Venkataraman, Thomas Yeh and Robert Kremens, System implications of implementing auto-exposure on consumer digital cameras, Proceedings of the SPIE Conference on Sensors, Cameras, and Applications for Digital Photography, vol. 3650, 1999.1: pp100-107
- 【14】 Simon Haykin 著, 神经网络原理, 第一版, 北京: 机械工业出版社, 2004
- 【15】 飞思科技产品研发中心, MATLAB 6.5 辅助神经网络分析与设计, 第一版, 北京:

电子工业出版社, 2003.1: pp 64-65

- 【16】 High- Performance Digital Camera Processor: AT76C113, Atmel Confidential
- 【17】 RICOH Z3.0X-3.3-1/2.7-2I-A Lens Moudle,初版, 台湾理光公司, 2002.3.25
- 【18】 AN12050A_Product_Standard, 关于 AN12050A CCD 图像传感器的说明
- 【19】 MN3114 说明书, System LSI Division Semiconductor Company MATSUSHITA Electric Industrial Co., LTD
- 【20】 Murali Subbarao, Tae Choi, Arman Nikzad, Focusing Techniques, SPIE, Vol.1823, 1992
- 【21】 Murali Subbarao, Jnn-Kwei Tyan, Stony Brook, The Optimal Focus Measure for Passive Autofocusing and Depth-from-Focus, SPIE, Vol.2598, 1995
- 【22】 B. K. P. Horn, Robot Vision, MrGraw-Hill Book Company, 1986
- 【23】 徐定杰, 王晓溪, 王武义, 陈健翼, 焦距标度数学模型的建立, 传感器技术, 1998 年第 17 卷第 4 期: pp33-36
- 【24】 Sang Ku Kim, Sang Rae Park, Joon Ki Paik, Simultaneous Out-of-focus Blur Estimation and Restoration for Digital Auto-focusing System, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.44, No.3, 1998.8
- 【25】 陈根华, 红外自动调焦的发展趋势, 现代照相机, 1992 年第 3 期
- 【26】 卢籁云, 红外自动调焦两点区间原理电路, 照相机, 1992 年第 5 期
- 【27】 冯华君, 主动式 PSD 自动对焦系统光学系统设计, 光学仪器, 第 20 卷, 第 1 期, 1998.2: pp13-17
- 【28】 王海夫, 全自动照相机的 AF 系统, 照相机, 1991 年第 2 期
- 【29】 一川, 中国应开发 AF 相机, 照相机, 2000 年第 2 期: pp8-10
- 【30】 王永仲, 据新军, 胡心, 智能光电系统, 第一版, 北京: 科学出版社, 1999.3
- 【31】 GuangLin Wang, DaWei Chen, ChongDe Tao, Research on Auto-focusing System Based on Image Processing, SPIE, Vol.3650, 1999
- 【32】 唐成辉, 朱森元, 王旭辉, 计算机控制下的显微镜自动调焦技术, 四川兵工学报, 第 20 卷, 第 4 期, 1999.12: pp41-43
- 【33】 Wolfgang Kessler, Jan Fischer, Analytical Model of Autofocus System With CCD Camera, SPIE, Vol. 2000
- 【34】 Kenneth R. Castleman, 数字图像处理, 第一版, 北京: 电子工业出版社, 1998.10
- 【35】 吴振锋, 左洪福, 邱根良, 光学显微镜的自动聚焦的技术研究, 光学仪器, 第 22

卷, 第 4 期, 2000.8: pp9-12

- 【36】 Je-Ho Lee, Kun-Sop Kim, Byung-Deok Nam, Jac-Chon Lee, Yong-Moo Kwon, Hyoung-Gon Kim, Implementation of a Passive Automatic Focusing Algorithm for Digital Still Camera, IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol.41, No.3, 1995.8
- 【37】 何小海, 吴小强, 吴光国, 显微图像系统调焦精度的确定与聚焦算法选择, 四川大学学报, 第 34 卷, 第 4 期, 1997.8
- 【38】 Miguel Bravo-Zanoguera, Jeffrey H. Price, Analog Autofocus Circuit Design for Scanning Microscopy, SPIE, Vol. 2982, 1997
- 【39】 McKeogh L. Sharpe, J.Johnson K, A Low-cost Automatic Translation and Autofocusing System for a MicroScope, Measure Science Engineering, Vol.6, 1995
- 【40】 白立芬, 徐毓娴, 于水, 李庆祥, 基于图像处理的显微镜自动调焦方法研究, 仪器仪表学报, 第 20 卷, 第 6 期, 1999.12: pp612-614
- 【41】 李贺桥, 张以谟, 于水, 李庆祥, 基于图像处理的显微镜自动调焦的研究, 光学学报, 第 15 卷, 第 8 期, 1995.8
- 【42】 许盛, 李见为, 高级显微镜智能化自动对焦系统的研究及实现, 光学仪器, 第 22 卷, 第 5 期, 2000.10
- 【43】 Tse-Chung Wei, Murali Subbraro, Continuous Focusing of Moving Objects Using DFDIF, SPIE, Vol.2183, 1994
- 【44】 Chung Nam Cho, Sang Kyu Kang, Joon Shik Yoom, Joon Ki Paik, Digital Auto-Focusing of Multiple Objects Based on Image Restoration, SPIE, Vol.4067, 2000
- 【45】 Sang Ku Kim, Joon Ki Paik, Out-of-focus Blur Estimation and Restoration for Digital Auto Focusing System, Electronic Letters, Vol.34, 1998.1
- 【46】 李奇, CCD 照相机对焦及像质评价测试系统的研究, 浙江大学硕士学位论文, 1998
- 【47】 E. Krotkov, Focusing, International Journal of Computer Vision, 1, 1987: pp223-237
- 【48】 S. K. Nayar and Y. Nakagawa, Shape from Focus: An Effective Approach for Rough Surfaces, IEEE Trans. On PAMI, 16(8): 1994.8: pp824-831
- 【49】 M. Subbarao and T. S. Choi, Accurate Recovery of Three-Dimensional Shape from Image Focus, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995.3: pp266-274
- 【50】 M. Subbarao, T. S. Choi and A. Nikzad, Focusing Techniques, Journal of Optical

Engineering, 1993.11: pp2824-2836

- 【51】 J. Enns and P. Lawrence, A Matrix Based Method for Determining Depth from Focus, Proceeding of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1991.6
- 【52】 M. Subbarao and T.Wei, Depth from Defocus and Rapid Autofocusing: A practical Approach, Proceedings of the IEEE Computers Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Chanmpaign, Illinois, June 1992: pp773-776
- 【53】 A. P. Pentland, A New Scene for Depth of Field, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 4: pp523-531
- 【54】 M. Subbarao, Parallel Depth Recovery by Changing Camera Parameters, Second International Conference on Computer Vision, Florida, USA, 1998.10: pp149-155
- 【55】 M.Subbarao and G. Surya, Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach, International Journal of Computer Vision, 1994: pp271-294
- 【56】 T. Wei, Three-Dimensional Machine Vision using Image Defocus, Ph. D. Thesis, Dept. of Electrical Engineering, State University of New York, Stony Brook, 1994.10
- 【57】 G. Surya, Three-Dimensional Scene Recovery from Image Defocus, Ph. D. Thesis, Dept. of Electrical Engineering, State University of New York, Stony Brook, 1994.10
- 【58】 J. D. Gaskill, Linear System, Fourier Transforms, and Optics, John Willey & Sons, New York, 1978
- 【59】 M. Subbarao, Spatial-Domain Convolution/Deconvolution Transform, Tech. Report No.91.07.03, Computer Vision Laboratory, Dept. of Electrical Engineering, State University of New York, Stony Brook, NY 1794-2350
- 【60】 N. I. Akhiezer, The calculus of Variations, Blaisdell Publishing Company, First Edition, 1962, pp104-109
- 【61】 Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y. Solution of ill-posed Problems, Winston, Washington, DC, 1977
- 【62】 A. Rosenfeld and A. C. Kak, Digital Picture Processing, Vol. 1, Academic Press, 1982
- 【63】 D. C. Vargas, E. J. Rodriguez, M. Flickner, and J. L. C. Sanz, Spline and Spline Fitting Revisited, Image Technology, pp.403-437, Springer 1996
- 【64】 Meer. P and Weiss. I, Smoothed Differentiation Filters for Images, Journal of Visual

Communication and Image Representation, 1992. 3. 1

- 【65】 M. Subbarao and Y. F. Liu, Analysis of Defocus Image Data for 3D Shape Recovery using a Regularization Techniques, SPIE Vol. 3204, ISAM' 97, Pittsburgh, 1997.10
- 【66】 韩美玉, 冉炬明, 摄影技术中测光元件的应用与发展, 摄影技术, 2003 年第 4 期: pp14-15
- 【67】 胡兴军, 摄影设备中的测光元件及技术, 中国仪器仪表, 2004.7: pp1-4
- 【68】 关文俊, 和亮, 现代相机自动曝光的辅助功能, 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2001 年第 17 卷第 1 期: pp56-58
- 【69】 曾智, 计算机控制的镜头程序快门曝光量测试系统, 浙江大学硕士学位论文, 2001.1.6: pp4-5
- 【70】 伯弓, 从 EV 值谈到曝光参数方程加法系统, 1994 年第 3 期: pp8-10

在学期间所发论文

1. 徐培凤、李正明、孙俊,《基于图像的自动曝光算法研究》, 光学仪器, 2005 年。(已录用)
2. 李峰、徐培凤,《An Approach for Auto Focusing Based on Image Analysis》, 2004 年世界工程师大会, 2004.11.2~2004.11.6, 已发表