

光电技术应用

高分辨率 CCD 相机传递函数的实时计算

刘洋^{1,2}, 胡君¹, 吴伟平¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了获得大数据量、高速图像下传的高分辨率 CCD 相机的实时传递函数, 提出了一种基于图像快视与采集记录系统的 CCD 相机成像质量自动评价方法。应用计算机高速信息采集和存储技术, 在分析对比度传递函数和调制传递函数之间关系的基础上, 利用高对比度矩形靶标法计算 CCD 相机的传递函数, 设计了传递函数实时计算系统, 从而完成对 CCD 相机整机系统的像质实时评价。实验结果表明: 当像元数达到 20 000 个, 采集速度达到 3.2 Gb/s 时, 该方法能够高速率并且准确实时地计算传递函数。

关键词: CCD 相机; 实时计算; 调制传递函数; 对比度传递函数

中图分类号: 0439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2011)05-0745-04

Real-time Measurement of Transfer Function Based on High-resolution CCD Camera

LIU Yang^{1,2}, WU Weiping¹, HU Jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, CHN)

Abstract: In order to obtain real-time transfer function (MTF) of CCD camera, an automatic evaluation method of image quality based on high-resolution CCD camera is proposed. High-speed information acquisition and storage technology is applied in the test, transfer function (MTF) of CCD camera is calculated by the high contrast rectangular target method based on analyzing the relation of contrast transfer function and modulation transfer function, and real-time computing system for transfer function is designed. Thus, real-time evaluation of image quality based on CCD camera system is achieved. The experiment results show that when the number of pixels is up to 20 000 and the acquisition speed reaches 3.2 Gb/s, the MTF can be calculated by the method fastly and accurately in real time.

Key words: CCD camera; real-time calculation; modulation transfer function; contrast transfer function

0 引言

CCD 相机的成像系统主要由光学镜头、CCD 探测器及电子电路三大部分组成。CCD 探测器是一种光电转换部件, 由一组大小相同的 CCD 像元在线阵方向上有序排列而构成, CCD 探测器的图像记录过程是 CCD 像元积分离散采样过程, 包含 2 个成像过程: 一是像元积分成像过程, 即每个像元输出信号

与该像元上的入射光辐射强度成正比; 二是以像元中心距为采样间隔对连续图形目标的离散采样过程^[1]。电子电路完成采样信号的量化及数字信号的处理。采样是非线性过程, 但是量化是线性过程, 因此总是可以由线性系统理论在一定程度上近似研究和评价成像系统的性能。

调制传递函数(MTF)是表征器件成像质量的特性参数, 反映器件输出调制度和输入调制度之比与入射光空间频率的关系, 其含义为在各个空间频

收稿日期: 2011-05-04.

率下成像器的输出信号调制度与输入信号调制度的比。调制度定义为一定频率的正弦信号的振幅除以均值。调制传递函数作为全面、客观评价成像质量的主要指标,运用于成像质量评价,无论是基础理论还是相应的检测技术(包括检测理论、方法和检测设备)都比较成熟,它具有很多优点,并且从根本上克服了诸如星点检验、分辨率、几何像差等传统像质检验方法的不足之处。本文介绍了利用高对比度矩形靶标^[2],对 CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数进行实时计算的方法。

1 CCD 相机的 MTF 分析

根据线性系统理论,CCD 相机的调制传递函数可近似表示为其各组成部分的调制传递函数的级联,即光学镜头的 MTF、探测器的 MTF 和电子电路的 MTF 三者相乘。然而实际的成像电路通频带很宽所以电子电路引起的 MTF 下降可以忽略,因此只考虑光学系统以及探测器的 MTF。

1.1 光学系统的 MTF

光学系统的 MTF 包括衍射受限系统的 MTF_{衍射}、光学设计的 MTF_{设计}和光学加工装调引起的 MTF_{加工}。对于孔径为圆形的衍射受限透镜,它的调制传递函数为圆对称函数,其中在水平方向上的调制传递函数可由下式表示:

$$MTF_{\text{光学}} = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{f}{f_0} \right) - \frac{f}{f_0} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2} \right] \quad (1)$$

式中, f 和 f_0 分别为光学系统的像空间频率和像空间截止频率。 $f_0 = D/\lambda F$, 其中 D 为光学系统的通光口径, λ 为平均波长, F 为光学系统焦距。

光学加工装调因子是指由于光学加工以及装调过程的不完善造成的频率响应的衰减,比如光学像差和离焦等,实际光学系统的装调因子是随光学加工以及装调技术水平高低差异很大。

1.2 探测器的 MTF

当正弦靶标照在 CCD 上,按照傅氏变换原理的传递函数理论,CCD 探测器的几何尺寸的传递函数为

$$MTF_{\text{探测器}}(f) = \sin c(df) = \sin(\pi df)/\pi df \quad (2)$$

式中, d 为 CCD 器件相邻光敏单元(像元)的中心距。如果 $f = 1/2d$, 称为奈奎斯特频率,此时

$MTF(f) = 2/\pi$ 为 CCD 器件的最高理论调制传递函数值。

1.3 相机系统的 MTF

根据线性系统理论,CCD 相机系统 MTF 可以表示为

$$MTF_{\text{系统}}(f) = MTF_{\text{光学}}(f) \cdot MTF_{\text{探测器}}(f) \quad (3)$$

式中, $MTF_{\text{光学}}$ 和 $MTF_{\text{探测器}}$ 分别为光学系统和探测器的调制传递函数。

2 高分辨率 CCD 相机传递函数实时计算

2.1 MTF 的确定原理

CCD 相机 MTF 的测试是指在线性系统理论假定的情况下,进行的器件奈奎斯特频率的响应的测试^[3]。在测试过程中可以将 CCD 相机作为一个线性系统,采用输入信号与输出信号进行比较的方法得到系统的 MTF。标准的调制传递函数测试应选用正弦靶标作为输入目标,但是由于制作一光出射度随正弦波规律变化的靶标非常困难,不易保证精度,通过采用容易制造的矩形靶标替代正弦靶标作目标^[4],测试系统的对比度传递函数(CTF),从而间接得到系统的调制传递函数(MTF)。按照正弦级数展开的定义,可以将矩形分布函数展开成不同频率的正弦分布的叠加,可以下式表示:

$$CTF(f) = \frac{4}{\pi} \left[MTF(f) - \frac{1}{3}MTF(3f) + \frac{1}{5}MTF(5f) - \frac{1}{7}MTF(7f) + \dots \right] \quad (4)$$

在空间频率高于奈奎斯特频率下工作时,违反采样定理,出现混叠效应,存在假的 MTF 值,所以在对 CCD 相机进行对比度传递函数分析时,工作频率只能到奈奎斯特频率。因此,对于空间频率为奈奎斯特极限频率的对比度传递函数与调制传递函数之间满足下面的关系:

$$CTF(f) = \frac{4}{\pi} MTF(f) \quad (5)$$

$$CTF = M_o/M_i \quad (6)$$

其中, M_o 和 M_i 分别为输出调制度和输入调制度,调制度的定义如前所述。

2.2 传函实时计算系统的结构

传函实时计算系统由靶标、平行光管、CCD 相机、转台以及图像快视与采集记录系统组成。如图 1 所示。为了模拟无穷远的景物目标,将靶标安置

在平行光管的焦面处。将 CCD 相机放在转台上,调整转台使得 CCD 接收光敏面处在相机镜头焦面处,同时要保证 CCD 像元与矩形靶标条纹的中心线对准。调整平行光管的位置使之与相机镜头的光轴共轴^[5]。标准光源将靶标照亮,经平行光管及相机镜头成像后被探测器接收,转换为输出电信号,再经过相关的电路,由图像快视与采集记录系统进行信号采集和存储并予以量化成数字灰度值。照明光源采用直流供电的积分球,关闭室内的日光灯,避免 50 Hz 交流信号的干扰,保证光源均匀照明。

由于本方法是实时计算相机在奈奎斯特频率下的调制传递函数,因此当 CCD 像元的尺寸为 $d \times d$, 相机系统的空间截止频率也就是奈奎斯特频率为 $f = 1/2d$ 时,在选取矩形靶标时要保证矩形靶标黑白条纹的频率为 $f = 1/2d$ 。

图像快视与采集记录系统主要完成对 CCD 相机图像数据的采集与快速显示以及对 CCD 相机图像数据的长时间实时采集和无压缩记录,同时可完成图像回放及部分处理分析功能。图像快视与采集记录系统采用加拿大 IO Industries 公司的 CLSAS 高性能采集记录卡和专业记录分析软件 Stream5 为基础。CLSAS 采集卡将相机的数据分成独立的两路,一路用于实时显示,另一路用于记录,互不干扰。Stream5 软件提供了二次开发功能,内部含有 filter 过滤器能够完成在图像采集过程中进程图像分析,从而实现了传递函数的实时计算。由于图像快视与采集记录系统所采用的数字接口为 Camera link,而 CCD 相机的接口为 LVDS,因此需要一个转换卡将相机输出的 LVDS 信号转换成 Camera link 信号。

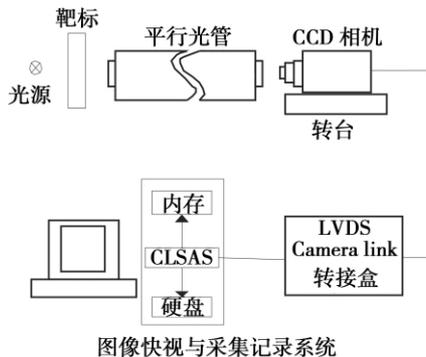


图 1 系统示意图

2.3 传函实时计算方法

在实际应用中,由于像元数大于 15 000 个且行

频超过 15 000 Hz,若每个像元用 8 位存储,采集速度将超过 1.8 Gb/s,如果一帧采用 500 行,刷帧的频率将达到 30 Hz,然而由于静态传函计算过程中图像的相对静止,不需要每帧都确定受检区,对于受检区的频繁确定就会使得计算速率下降,因此本文采用首行采样与尾行验证相结合的方法确定受检区域,只取首行和尾行的受检区域的交集作为图像的受检区域,并且 5 s 才重新确定一次传函受检区域,加快了计算速率。以下为应用本方法的传函实时计算具体实现过程。软件流程图如图 2 所示。

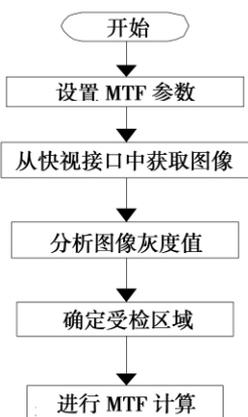


图 2 程序流程图

对获取的图 3 进行灰度值分析,灰度值曲线如图 4 所示。图像的灰度值数据由一个 $m \times n$ 的矩阵存储, m 是图像的高度(即行,单位为像素); n 是图像的宽度(即列,单位为像素)。每个像元对应一个点。在本次计算中,每个像元用 8 bit 存储,因此图像的灰度级数为 $2^8 = 256$ 。

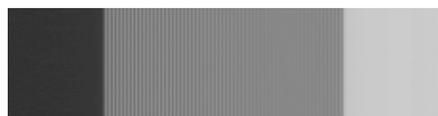


图 3 测试图像

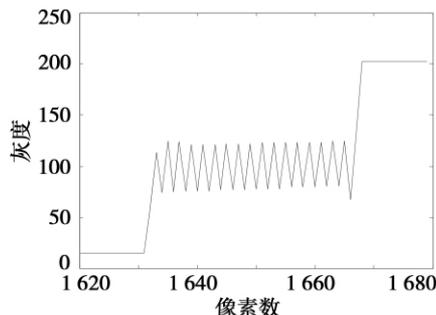


图 4 图像的灰度值

(1)确定受检区域

采用首行采样的方法,通过预先设定的阈值(黑

底色为 21, 白底色为 200) 区别受检区和非受检区, 如图 3 所示。若一点 $f(x, y)$ (x 表示行, y 表示列) 的灰度值处于 21 和 200 之间, 并且满足 (7) 式或 (8) 式, 那么 (x, y) 为受检区域中的点。

$$f(x, y) > f(x, y + 1) \text{ 且 } f(x, y) > f(x, y - 1) \quad (7)$$

$$f(x, y) < f(x, y + 1) \text{ 且 } f(x, y) < f(x, y - 1) \quad (8)$$

将首个满足上述条件的点所在的列作为受检区域的开始, 继续向行尾查找, 当遇到非受检色值时, 将此点的列值记录为受检区的结束列值, 直到找到全部的满足条件的点, 此时能够得到首行的所有受检区域。

利用上述方法获得尾行的所有受检区域, 若 $[i, j]$ 为首行的受检区域, $[u, v]$ 为尾行的受检区域, 那么取 $[p, q] = [i, j] \cap [u, v]$ 即首行与尾行受检区域的交集做为整个图像的受检区域。

(2) 实时计算 MTF 由于受检区域中可能存在离黑白底色特别近的点, 为了避免这些点对 MTF 计算带来的误差, 在进行 MTF 计算之前, 需要精确确定受检区域, 删除离黑白底色最近的点, 采用的方法如下: 若 (x, y) 是受检区域的起始点, 则令起始点的列值加 1; 若 (x, y) 是受检区域的终止点, 则令终止点的列值减 1, 即令受检区域向内缩 2 列; 当受检区域的终止点列值大于起始点列值时, 计算受检区域中的调制度, 最后得到调制度最大值, 存储得到的结果。

2.4 结果与分析

在实验室中, 对某 CCD 相机进行 MTF 测试。测试中各项参数为: 靶标条纹宽度为 $10 \mu\text{m}$, CCD 像元的几何尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 像元数有 20 000 个, 行频为 2 000 行/秒, CCD 相机的焦距为 5 m, 波长为 $0.555 \mu\text{m}$ 则: 系统奈奎斯特频率为 $f = 50 \text{ lp/mm}$, 通过公式 (3) 可以算的 CCD 相机在系统奈奎斯特频率处传函数的计算值为 0.51, 采集速度 $v = 20000 \times 20000 \times 8 = 3.2 \text{ Gb/s}$, 实时计算软件必须工作在高性能系统上, 利用表 1 所示的主要指标实际进行传函测试时 CPU 利用率不到 20%, 满足实验要求。

表 1 实验条件

主板	CPU	内存	操作系统
Supermicro XTDAE	Intel(R) XEON(R) 54052.0 GHz/12 M, 1333FSB	PC2-3200, DDR2, 1G, 4 条	windows XP professional

利用上述实验条件, 结合 MTF 测试结构和计算方法, 结果是: 计算值为 0.51, 实验值为 0.49。

可见, 实验得到的 MTF 与理论计算值相近, 利用本方法对 CCD 相机进行传递函数的实时计算是完全可行的。

3 结论

本文针对大数据量、高速图像下传的高分辨率 CCD 相机对采集速度的要求, 同时在保证传函计算速率的基础上, 采用高对比度矩形靶标法对传递函数进行测量, 数据处理简单可靠并且能够实时计算传函。利用图像快视与采集记录系统能够实现高速采集图像, 并且在采集图像过程中分析图像, 采用首行采样与尾行验证相结合的方法, 尽可能的减少受影响的点, 能够提高计算精度, 同时通过延长受检区域的重复确定时间使计算效率大大提高。

参考文献:

- [1] 张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙, 等. 传输性 CCD 相机综合像质评价方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 697-701.
- [2] 杨 桦, 焦文春, 朱永红, 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. 光学学报, 2002, 22(3): 313-316.
- [3] 关英姿, 韩四宁. CCD 相机调制传递函数测试软件的研制[J]. 应用光学, 2004, 25(6): 54-56.
- [4] 樊 超, 易红伟, 李英才. 航天相机 MTF 测试靶标研究[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 174-176.
- [5] 林德萃. CCD 相机调试和质量评估中 MTF 测量的一些体会[J]. 航天返回与遥感, 1999, 19(2): 24-29.

作者简介:

刘 洋(1986—), 女, 吉林人, 硕士研究生, 主要研究方向是图像处理。

E-mail: liuyang1018411@163.com

欢迎订阅 2012 年《半导体光电》