

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210452

# 基于 Android 平台的相机清晰度检测系统

黄志成 李丹 夏坤 王朝松 张宝龙

(天津科技大学电子信息与自动化学院 天津 300222)

**摘要:** 为了能够实时、准确地完成对光学系统清晰度的检测,提高相机模组的一致性,本文设计了一款基于安卓平台的相机清晰度检测系统。在相机装配的主动对准过程中,通过测量调制传递函数的方法,来评价相机的成像清晰度。不同于市面上现有的检测仪器,该检测系统体积小、普适性强、操作方便、成本较低、可实时记录相机模组在不同状态下的调制传递函数,达到检测相机模组成像质量的目的。在相机模组检测领域中,该系统更易实现商业化和产业化价值。

**关键词:** 主动对准;调制传递函数;相机;安卓

**中图分类号:** TP212.14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Camera definition detection system based on Android platform

Huang Zhicheng Li Dan Xia Kun Wang Chaosong Zhang Baolong

(College of Electronic Information and Automation Tianjin University of Science &amp; Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In order to more accurately evaluate the sharpness of the optical system and improve the qualification rate of camera products, this paper designs a camera sharpness detection system based on the Android platform. During the active alignment process of the camera assembly, the image sharpness of the camera is evaluated by measuring the Modulation Transfer Function. Unlike the existing inspection instruments on the market, this inspection system is small, strong universality, easy to operate, low cost and can record the Modulation Transfer Function of camera modules in different states in real time for the purpose of inspecting the image quality of camera modules. The system is more likely to be commercially and industrially viable in the field of camera module detection.

**Keywords:** active alignment; modulation transfer function; camera; Android

## 0 引言

随着智能物联网技术的迅猛发展,作为人机交互终端设备的相机模组被广泛地应用在智能设备中,例如智能手机、智能监控、智能汽车、智能机器人等<sup>[1]</sup>。可以看出,在不同领域中相机已被作为至关重要的获取图像信息的“眼睛”。例如在智能汽车领域中,一辆具有高级辅助驾驶系统的汽车将至少配备 8 个相机,其中包括前视相机、环视相机、DMS(driver monitoring system)相机等<sup>[2]</sup>。同时消费者对视觉极致体验的需求推动了相机模组分辨率从百万级向亿万级<sup>[3]</sup>发展。然而相机成像清晰度的优劣不仅取决于图像传感器和镜头的分辨率,还由相机模组的同轴度所决定。因此对相机成像清晰度实时、准确的检测是相机模组装配中必不可少的过程。在评价相机成像清晰度的众多指标中,调制传递函数(modulation transfer function, MTF)是国内外最为客观的评定标准之一,它阐明了一部相机空

间分辨能力的优劣<sup>[4]</sup>。一般来说,MTF 的高频部分反映了相机呈现物体细节的能力,低频部分反映了相机呈现对比度的能力<sup>[5]</sup>。目前测量 MTF 的方法主要包括星点法、狭缝法、刃边法。刃边法又分为垂直刃边法和倾斜刃边法,由于垂直刃边法只采集一行像素的亮度信息,而倾斜刃边法通过超采样得到更多行的像素亮度信息,使测量数据更加精准,所以本设计采用了倾斜刃边法。国际标准 ISO12233 就将倾斜刃边法列为测量 MTF 的标准方法。

目前检测 MTF 的仪器主要包含两类:一类是面向科研的高精尖大型仪器,其代表为 OGE 公司研发的 MTF 检测系统 Variant<sup>[6]</sup>,该系统可以根据被测系统的需求自由组合测试功能,测量精度为 $\pm 0.02$ ,重复性为 $\pm 0.01$ ,这类仪器一般都造价昂贵、体积较大、操作复杂,所以难以得到很好的推广。另一类是以度信科技有限公司研发的相机模组测试盒为代表的小型专业化测试仪器<sup>[7]</sup>,这类测试仪器成本低、体积小、操作简单、测量精度高,完美地克服了人眼目

收稿日期:2022-06-24

测成像清晰度所带来的不客观性和不准确性等问题。但是这类小型专业化的测量仪器系统相对封闭、普遍适用性较差,需要根据测试对象和测试条件的不同经过专门的制定。于是为了使检测系统能够适用于不同的相机模组和测试环境,经过对 MTF 测量原理及方法的深入研究,本文设计了以倾斜刃边法为核心的检测算法,并将检测算法移植到更加开放的通用型安卓平台上,使该系统能够实时、稳定、快速、简洁地测量相机模组的 MTF。相比于现存的大型化、专业化测量仪器,该系统的普遍适用性更强、造价更低。

## 1 调制传递函数的测量原理

### 1.1 调制传递函数的定义

MTF 是调制传递函数的简称,它和相位传递函数共同组成了光学传递函数,由于相位对成像质量的影响不大,所以一般只研究 MTF<sup>[8]</sup>。MTF 是光学系统对不同空间频率正弦信号的响应,如图 1 是标准的不同空间频率的正弦光栅。

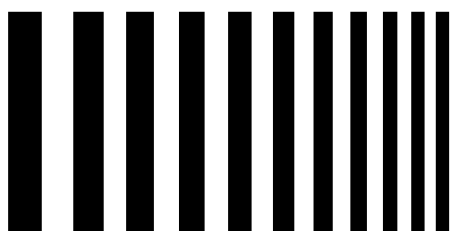


图 1 正弦光栅

光信号可以看作是很多不同频率的光波组合而成,在经过傅里叶变换处理后可以将其分解为若干不同频率的正弦函数。光学系统是一个线性不变系统,所以光信号通过光学系统后其频率是不变的,但是其调制度会有所下降,也会存在一定的相位偏移。与物的调制度的比值会在某一频率处变为 0,此处为截止频率。物的空间频率越高,对成像系统的成像能力要求就越高。

光学系统正弦光栅成像,由于受到相机成像能力的影响,拍摄出正弦光栅像的对比度会降低。调制度  $M$  的公式是:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

其中,  $I_{\max}$  是正弦光栅的亮度极大值,  $I_{\min}$  是正弦光栅的亮度极小值。

MTF 的定义<sup>[9]</sup>是:

$$MTF = \frac{M'}{M} \quad (2)$$

其中,  $M'$  是像的调制度:

$$M' = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (3)$$

其中,  $I'_{\max}$  是像的亮度极大值,  $I'_{\min}$  是像的亮度极小值。由于光学系统组件的各种限制条件,比如像元的大小、

镜头光圈、焦距等因素导致所成像的对比度下降。调制传递函数 MTF 就是像的调制度与物的调制度之比。在图 2 所示的空间频率中,其中物的正弦光栅亮度极大值  $I_{\max}$  为 500,亮度极小值  $I_{\min}$  为 1,则物的调制度  $M$  为 0.996;像的亮度极大值  $I'_{\max}$  为 150,像的亮度极小值  $I'_{\min}$  为 1,则像的调制度  $M'$  为 0.987。根据式(2)可以得出该光学系统的 MTF 值是 0.99。

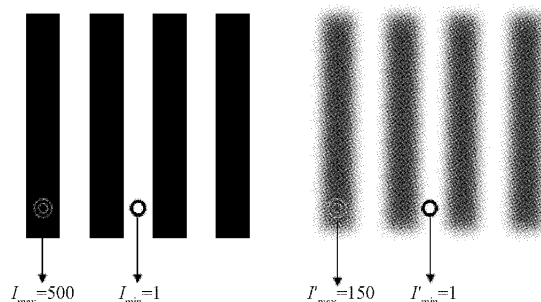


图 2 物与像的调制度

### 1.2 测量调制传递函数的原理及方法

在信号与系统中,线性不变系统的输入和输出存在一定的关系,当输入为  $g(x, y)$ , 输出为  $f(x, y)$ , 系统的脉冲响应为  $h(x, y)$  时,存在如下关系:

$$f(x, y) = g(x, y) * h(x, y) \quad (4)$$

其中,  $*$  表示卷积,输出为输入和脉冲响应的卷积。光学系统中,假设输入为平行于  $x$  轴的线光源  $a(y)$ , 即:

$$g(x, y) = a(y) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得:

$$f(x, y) = a(y) * h(x, y) \quad (6)$$

此时得到的输出函数  $f(x, y)$  就是系统的线响应  $L(y)$ , 即系统的线扩展函数(line spread function, LSF)。对 LSF 进行一维傅里叶变换就得到沿  $y$  轴方向的传递函数。因为脉冲响应是旋转对称的,所以得到的传递函数也是旋转对称的。这样系统的传递函数就可以通过沿  $y$  轴方向的传递函数得到。

鉴别率法是最早出现的评价成像清晰度的方法,这种方法操作简单,它是根据人眼的对比调制度极限来定义的。它的缺点是具体的数值因人而异,没有统一的标准。现代光学将电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)、互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)等光电传感器作为图像接收器,使测量光学调制函数的结构更加简单,方法也越来越多。其中星点法测量 MTF 是对点扩散函数(point spread function, PSF)进行傅里叶变换得到 MTF。其中 PSF 是通过一颗理想点光源获得的,而在实际操作中想要获得一颗理想的点光源是比较困难的,所以一般很少采用星点法来测量 MTF。狭缝法是间接测量方法,该方法对狭缝的宽度、厚度和两条刃边的平行程度要求都很高,这使生产工艺的难度大大增加。刃边法可以有效解决星点法和狭缝法的缺陷,刃边法的测试图

卡制作起来相对简单,它只需要一条固定倾斜角度的刃边。本系统所采用的倾斜刃边法对图像中每一行的像素数据进行梯度计算,将梯度值最大的像素点作为该行的质心。求出每一行的质心后,排除误差较大的像素点,然后将符合要求的质心连接起来,就得到了拟合的刃边直线。然后将图像中所有的像素亮度信息沿刃边直线的方向投影到 X 轴上。将水平方向的采样间隔设为  $0.25P$  ( $P$  为像素之间的间距),求出每个采样间隔中像素灰度值的平均值并将其作为 Y 值。根据上面计算出的 X, Y 值绘制出边缘扩展函数 (edge spread function, ESF)。然后对 ESF 进行微分处理得到 LSF, 再对 LSF 进行傅里叶变换得到 MTF, 如图 3 所示。采用倾斜刃边法测量 MTF 具备很多优点: 第一是刃边法的目标物是刀口形物体, 比狭缝法和星点法的光源更好获得, 且目标物更容易加工; 第二是通过刀口形目标物获得的能量要远远大于狭缝法和星点法; 第三是狭缝法中的刀口可以避免狭缝带来的衍射效应; 第四是测量出来的 MTF 值不需要进行校正; 第五是不需要额外的目标直器<sup>[10]</sup>。

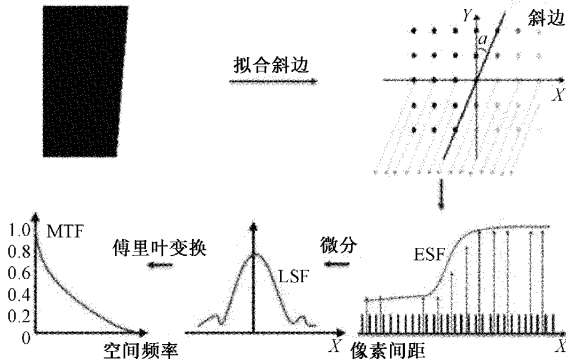


图 3 刃边法计算 MTF 流程

## 2 软件设计

### 2.1 算法流程

计算 MTF 的算法流程如图 4 所示, 在进行连续的 MTF 计算之前需要先选取合适的兴趣区域 (region of interest, ROI)。根据 IOS12233 国际标准, 选取的 ROI 必须满足均匀性、线性度、刃边倾角在  $5^\circ \sim 10^\circ$ , 对比度等要求, 具体要求可参考 IOS12233 标准<sup>[11]</sup>。

将选取的倾斜刃边转换成含有对应像素点亮度信息的矩阵, 然后对图像矩阵进行非空判断。如果矩阵里的数据为空, 则提示重新选择 ROI, 若矩阵里面有数据且数据满足标准, 则对每一行数据进行滤波, 去除偏差较大的数据。然后根据式 (7) 计算出每一行像素的质心并将质心存在  $Cen\_shift[i]$  中。

$$Cen\_shift = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} i + (\chi_{i+1} - \chi_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} (x_{i+1} - \chi)} \quad (7)$$

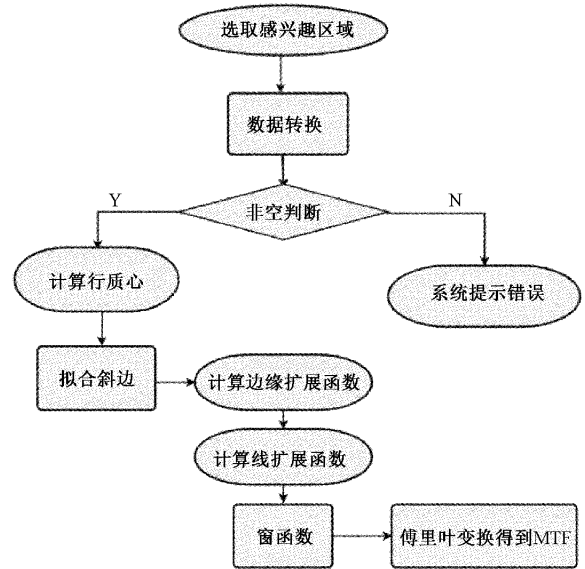


图 4 计算 MTF 代码流程

然后判断第一行与最后一行的  $Cen\_shift$  与图像边框的距离, IOS12233 规定的质心与边框的距离要  $\geq 2$  个像素, 这样做是为了保证倾斜刃边的角度在规定的范围内。在得到每一行质心之后, 首先应用式 (8) 计算出  $x_0, y_0$ 。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=0}^n Cen\_shifts[i]}{n} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=0}^n y\_shifts[i]}{n} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $Cen\_shifts[i]$  为每行质心与中心行质心的横坐标差,  $y\_shifts[i]$  为每行质心与中心行质心的纵坐标差。然后应用线性回归方程式 (9) 得到刃边的斜率和截距。为了保证斜率为正值, 所以将斜率取绝对值, 然后重新计算截距。至此, 得到了倾斜刃边的拟合直线。

$$\begin{cases} k = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - x_0)^2}{\sum_{i=0}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0)} \\ a = y_0 - \chi_0 b \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $k$  是截距,  $a$  是斜率,  $x_i$  是每行质心的横坐标,  $y_i$  是每行质心的纵坐标。在得到倾斜刃边拟合直线后, 根据前文讲到的 MTF 测试方法, 将像素的亮度信息沿该直线的角度投影到  $x$  轴上。用原有 CMOS 采样间隔的  $1/4$  完成四倍超采样, 然后求取每一个采样间隔的平均数, 这样就得到了 ESF。对 ESF 求导就得到了 LSF。理论上对 LSF 进行傅里叶变换就得到了 MTF。但是由于存在噪声和频率泄露等问题, 所以给 LSF 添加了一个汉明窗加权函数<sup>[12]</sup>。汉明窗又称余弦窗, 它可以看为 3 个矩形窗的频谱之和。给 LSF 添加窗函数主要是为了使 LSF 在时域上更好的满足快速傅里叶变换, 因为快速傅里叶变换只能对时

域有限的函数进行变换,而汉明窗函数能很好的满足这种周期性要求,并能减少频率泄露。其实窗函数有很多,汉明窗只是其中的一种,因为汉明窗函数的幅频特性是旁瓣衰减较大,主瓣峰值和第一个旁瓣峰值的差可以达到 40 dB 以上。对 LSF 进行加窗处理后再对其快速傅里叶变换,这样就得到了 MTF。

## 2.2 算法移植

为了实现测试仪器的小型化,将测试代码修改并移植到 Android 平台<sup>[13-14]</sup>,开发环境是 Android Studio 4.0。Android Studio(AS)是安卓开发平台,它的开发环境是 JAVA 语言,电脑端测量 MTF 的代码是使用 C++ 语言完成的,要将 C++ 语言移植到 Android 平台需要两部分内容,如图 5 所示。

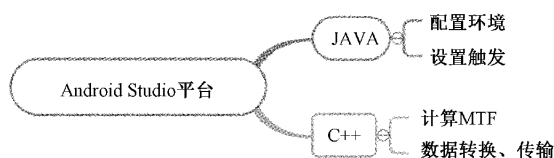


图 5 移植代码结构

主体部分用 JAVA 语言完成,它的主要功能包含:

- 1) 初始化开发环境(OpenCV 环境);
- 2) 打开相机并拍摄图像,将图像灰度化;
- 3) 将灰度化后的图像传递给 C++ 代码进行处理;
- 4) 接收处理完的数据并显示在 Android 平台上。

测试功能部分用 C++ 语言完成,它的主要功能包含:

- 1) 计算 MTF 值;
- 2) 将计算结果输出给主体部分进行显示。

完成以上配置后,需要将计算 MTF 的代码复制到 Java 的 native-lib.cpp 文件内。为了使主函数能够调用 native-lib.cpp 文件,需要将主函数名修改。除此之外,由于 C++ 与 JAVA 之间的数据类型存在差异,所以需要做一些转换工作使 JAVA 程序可以调用 C++ 的功能函数。至此,我们计算 MTF 的程序就可以在 Android 上运行。

## 3 实验结果及应用

### 3.1 实验结果

根据以上分析,基于 Android 平台的 MTF 检测是可行的。本实验分为三部分,首先确认测试代码可以在电脑端运行,然后确认移植代码可以在 Android 平台应用,最后通过对比实验说明该测试系统能够检测相机模组是否装配合格。

本系统采用自己设计的 CMOS 相机,在白炽灯照射的条件下,通过拍摄测试图卡可以完成测量任务。首先验证测试代码在电脑端是可以应用的,在 VC++ 中实现了此功能,并验证了算法各个步骤的正确性。并且得到了不同空间频率的 MTF 值(表 1)和 MTF 曲线(图 6),其中横坐标是空间频率,纵坐标是归一化后的 MTF 值。

表 1 MTF 计算结果

| 不同空间频率下的 MTF 值 |   |       |       |         |         |
|----------------|---|-------|-------|---------|---------|
| 空间频率           | 0 | 0.25  | 0.5   | 0.75    | 1       |
| 函数值            | 1 | 0.538 | 0.215 | 0.071 5 | 0.098 2 |

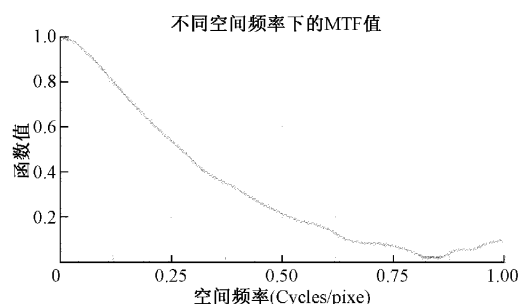


图 6 MTF 曲线

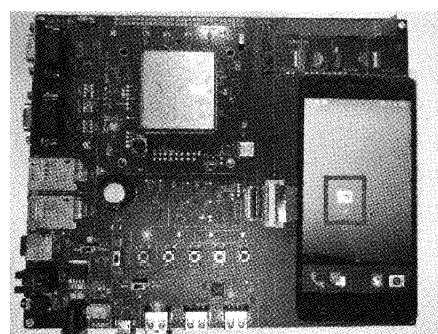


图 7 Android 系统实物图

在电脑端完成了功能验证之后,将测试程序移植到 Android 平台并完成 Android 平台的功能验证。该检测系统的实物的整体效果如图 7 所示,图中红色框部分就是移植成功的测试程序。最终可以将其封装到一台 Android 系统的应用平台上。

本系统的移植工作是在 Android studio 上完成的,在该平台实现功能后,我们将开发的程序下载到 Android 平台上并进行了实验。通过点击该图标可以打开与该平台连接的待测相机,然后点击拍照就可以自动输出计算结果,如图 8 所示。为了便于观察,我们将测试结果直接显示在屏幕左上角,且将测试数据输出保存在 CSV 文件中。此处我们选择了空间频率为 0.5 cycles/p 作为输出结果,可以通过修改代码来改变输出的参考值。

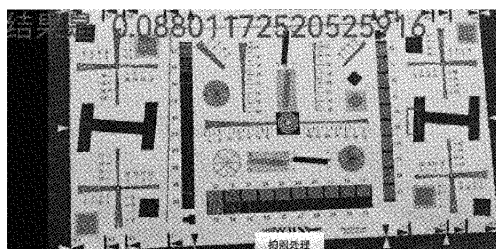


图 8 拍摄测试图卡斜边结果

### 3.2 应用

相机模组在装配过程中涉及到图像传感器、镜座、PCB板、镜头等零配件的多次组装,它们之间的相对位置会产生很大的装配公差<sup>[19]</sup>。这种偏差将导致进光量不能准确地反映在图像传感器的有效区域内,从而使得成像质量严重下降。这种情况下测得的 MTF 值将小于正常装配情况下的测量值。该系统测量的调制传递函数值并不需要很高的精度,所以此处并没有和其它仪器做对比实验。该系统用来衡量相机模组装配的是否达到出厂要求,我们只需要设置某一阈值,大于该阈值的就被认为是合格品,小于该阈值的就被认为是不合格品,该阈值可以通过测量某一合格产品的 MTF 值得到。

当镜头和图像传感器的光学中心未对齐时,所测得的 MTF 值为 0.054 433,校准光学系统后,测得 MTF 值为 0.214 758,如图 9 和 10 所示,同时系统将测试数据输出保存在表格中(部分如表 2 所示)。通过观察测试数据可知:相机模组在校准前后经系统所测得的 MTF 值相差较大。由此可将该检测系统应用于相机模组的生产过程中,装配人员利用检测系统对完成预调焦的相机模组进行检测,系统实时输出相机模组的调制函数值并保存,装配人员则以系统输出为依据评判相机模组是否合格。

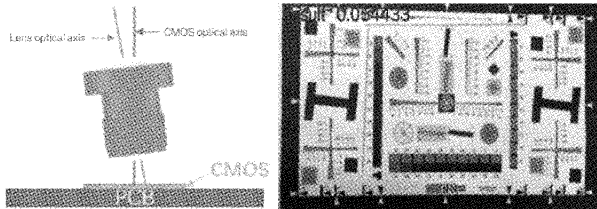


图 9 未对齐测量结果

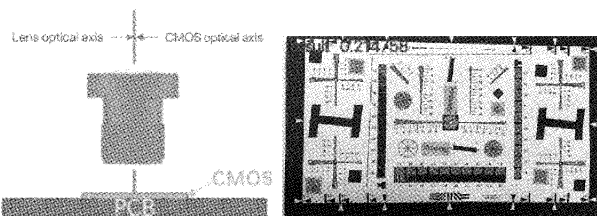


图 10 对齐测量结果

表 2 系统输出的 CSV 文件

| 频率          | 采样数据      |
|-------------|-----------|
| 0           | 1         |
| 0.035 714 3 | 0.973 798 |
| 0.071 428 6 | 0.904 722 |
| 0.107 143   | 0.824 138 |
| 0.142 857   | 0.745 099 |
| 0.178 571   | 0.668 977 |
| 0.214 286   | 0.600 058 |
| 0.25        | 0.537 762 |

### 4 结 论

本文设计的基于 Android 平台的 MTF 计算系统将传统的 MTF 测试仪器集成到更加开放的平台,实现了测试仪器小型化,更加直观便捷。它不仅测试 MTF,在此基础上,我们还可以在该平台集成更多的测试功能,例如颜色测试,畸变测试等等。该平台还可以应用在相机模组装配过程中,能更加精确的调整配件的位置,提高产品合格率。在以后的应用中该系统可以和自动对焦系统相结合,在测试 MTF 值的同时记录不同组件的相对位置并发送调焦信号,可以提高调焦的速度和精确度。

### 参考文献

- [1] YAN T C. Research on resolution detection method of camera module [D]. Xi'an: Xi'an University of technology, 2017.
- [2] ZHANG B L, DU K X, LIU X F, et al. Design of camera of all-weather vehicle driver monitoring system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 109-116.
- [3] SZELISKI R. Video mosaics for virtual environments[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(2): 22-30.
- [4] GUAN M Z. Study on MTF Measurement of CCD Camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [5] 姚大杰. MTF 测量方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [6] 于谦. 光学检查镜头的 MTF 测试方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [7] PAH H J, LEE S W, LEE D S. Computer aided measurement and compensation system for focal length of lenses in camera manufacture based on the MTF performance using the line CCD sensor [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10): 1493-1511.
- [8] 杜康,刘春雨,谢运强,等. 基于非球面的大相对孔径微型星敏感器镜头设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 96-103.
- [9] 徐宁珊,任国强,黄永梅. 可见光遥感成像性能指标与图像特征相关性分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 114-120.
- [10] 袁航飞,郭永飞,司国良,等. 正态分布模拟倾斜刃边图像的 MTF 测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 1-10.
- [11] ESTRIBEAU M, MAGNAN P. Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12333 slanted-edge methodology[C]. Detectors & Associated Signal Processing. International Society for Optics and Photonics, 2004.

- [12] 唐麟,刘琳,苏君红. 热成像系统空间分辨率退化建模及仿真[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 21-27.
- [13] 董建婷,陈伟,史漫丽. 基于刃边法的 MTF 实时测试技术实现[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 349-351.
- [14] 李神送,温嘉铭,刘学锋. Android 手机上传感器信息的实时获取与可视化[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 104-107.
- [15] 闫钧华,吕向阳,时萌玮,等. 遥感成像耦合典型误差源反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 42(6): 200-210.

### 作者简介

**黄志成**, 硕士, 主要研究方向为光电检测和计算机视觉检测。

E-mail: 635497416@qq.com

**李丹**, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光电检测与计算机视觉检测。

**夏坤**, 硕士研究生, 主要研究方向为光电检测。

**王朝松**, 硕士, 主要研究方向为光电检测与计算机视觉检测。

**张宝龙**(通信作者), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为集成电路设计及半导体制备工艺。

E-mail: eezbl@tust.edu.cn