

# 模板法测量图像传感器调制传递函数方法研究\*

鲁 进 陈伟民 岑军波

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘 要** 在干涉条纹投射法测量的基础上, 提出了利用正弦模板法测量图像传感器调制传递函数的新方法. 通过将一定空间频率的正弦模板直接投射在图像传感器上, 获得了同频率光强呈正弦分布的图像, 通过计算求出图像传感器的调制传递函数. 讨论了其具体实现方法, 并用空间频率为 50l/mm 的计量光栅做了近似实验, 采用了相应的数据处理方法, 获得了较为满意的调制传递系数.

**关键词** 调制传递函数; 图像传感器; 正弦模板法; 干涉条纹投射法

中图分类号 TN386 文献标识码 A

## 0 引言

调制传递函数作为评价图像传感器的成像质量指标可能遇到的理论问题已经解决<sup>[1]</sup>, 用调制传递函数来评价图像传感器的成像质量, 有各种具体的方式<sup>[2,3]</sup>.

目前测量图像传感器调制传递函数的方法归纳起来主要有两大类. 第一类方法需要利用光学系统将靶标函数引入图像传感器像面, 比如点光源法和刃边法等. 这类方法由于光学系统调制传递函数的引入, 会对图像传感器的调制传递函数产生影响, 而且测得的图像传感器的调制传递函数只是在少数像元而非整个图像传感器像面上获得. 另一类方法则不需要引入光学系统, 而是将光强按一定空间分布的输入函数直接通过图像传感器成像, 从而产生灰度按一定分布的输出函数图像, 通过计算即可求出图像传感器的调制传递函数. 基于这种思想发展起来的主要有散斑法<sup>[4]</sup>和干涉条纹投射法. 它们均不会引入附加的光学系统的调制传递函数, 而且图像传感器的调制传递函数是在整个像面上获得, 但是散斑法的数据处理非常复杂. 干涉条纹投射法虽然解决了散斑法数据处理复杂的缺点, 但是要比较精确地控制输入函数的空间频率却相当困难. 因此, 如何发展一种测量图像传感器调制传递函数的新方法, 使其既能保留干涉条纹投射法的优点, 又能很方便地获得所需要空间频率的正弦函数, 就成为当前的迫切需要.

## 1 干涉条纹投射法的基本原理

如图 1, 干涉条纹投射法的基本原理就是利用干涉仪产生空间频率连续可变且光强呈正弦分布的等厚干涉条纹, 并将此条纹垂直投射在图像传感器

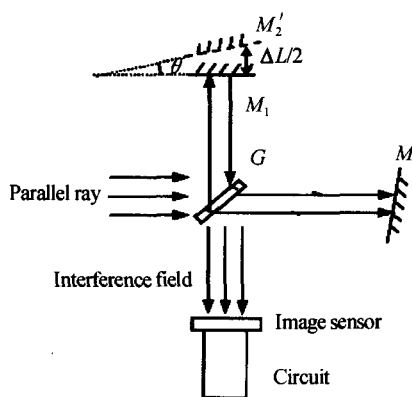


图 1 干涉条纹投射法原理  
Fig. 1 Schematic of interferential fringe measurement method

上成像. 若波长为  $\lambda$  的单色光源发出光强为  $I_0$  的平行光, 经分光板  $G$  后分成两束光, 忽略分光板及反射镜对光能的吸收, 且分光板为半透半反镜, 则在理想情况下, 在干涉场中两束光的光程差为  $\Delta L$  的地方, 叠加点的光强分布为

$$I = I_0 + I_0 \cos \left( 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} \right) \quad (1)$$

则产生的干涉条纹是明暗呈等间距分布的正弦条纹. 若将此干涉条纹作为输入函数直接投射到图像传感器上, 则在理想情况下, 由光学传递函数理论可知, 此时输入图像传感器的正弦函数的对比度为<sup>[5]</sup>

$$C_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2I_0 - 0}{2I_0 + 0} = 1 \quad (2)$$

输入的正弦函数经图像传感器成像, 输出相同空间频率的正弦图像. 若  $I'_{\max}$  表示从图像传感器上输出正弦函数灰度的极大值,  $I'_{\min}$  表示从图像传感器上输出正弦函数灰度的极小值, 同样由光学传递函数理论可知, 此时从图像传感器输出的正弦函数的对比度为<sup>[5]</sup>

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

由式(2)和式(3)可得出此时的调制传递系数为<sup>[5]</sup>

$$MTF = \frac{C_o}{C_i} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4)$$

在通常情况下,对不同空间频率的正弦函数成像时,调制传递系数是不同的,调制传递函数是空间频率  $r$  的函数. 因此,只要获得不同空间频率下光强呈正弦分布的输入函数,将其通过图像传感器成像,就可以利用式(4)计算出图像传感器的调制传递函数. 输入图像传感器的正弦函数的不同空间频率的获得是通过改变两平面反射镜  $M_2$  与  $M_1$  之间的夹角来实现的. 假设平面反射镜  $M_2$  与  $M_1$  之间的夹角为  $\theta$ ,则干涉条纹的空间频率  $r$  为相邻明条纹或暗条纹之间距离  $l$  的倒数,即

$$r = \frac{1}{l} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \quad (5)$$

由前面的分析可以看到,若想获得准确的调制传递函数,就必须精确控制两平面反射镜  $M_2$  与  $M_1$  之间的夹角  $\theta$ ,以达到产生空间频率稳定且精确的正弦函数的目的. 但是在实验中,两平面反射镜  $M_2$  与  $M_1$  之间的夹角  $\theta$  的改变量是非常小的. 由式(5)可以计算出若采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为迈克尔逊干涉仪的光源,当空间频率每改变 10 1/mm 时,角度的变化量约为 0.1813°,这样微小的角度变化量在实际中是很难办到的. 而且由于对角度进行的是机械调节,两次实验不可能控制使得两平面反射镜  $M_2$  与  $M_1$  之间的夹角  $\theta$  完全相同,而微小的夹角变化将会使得产生的正弦函数的空间频率有大幅度的变化,这样就会使得实验的可重复性较差.

## 2 正弦模板法的基本原理

为了解决干涉条纹投射法很难精确控制两反射镜  $M_2$  与  $M_1$  之间的夹角  $\theta$  的问题,并提高测量的可重复性,提出了一种利用正弦模板法来测量图像传感器的调制传递函数的新方法. 正弦模板法的基本思想就是在干涉条纹投射法的基础上,将产生干涉条纹的迈克尔逊干涉仪换成透过率呈正弦分布的模板,如图 2. 若正弦模板的光强透过率分别为  $T(x)$ ,

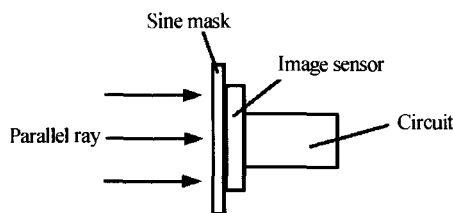


图 2 光栅模板法测量的原理  
Fig. 2 Schematic of measurement method using sine mask  
当光强为  $I_0$  的平行光均匀地照射在正弦模板上时,从正弦模板出射光的光强  $I'$  为

$$I' = I_0 \cdot T(x) \quad (6)$$

由于正弦模板的光强透过率  $T(x)$  是呈正弦分布的,因此从正弦模板出射光的光强  $I'$  也呈正弦分布,这就相当于产生了迈克尔逊干涉仪所产生的光强呈正弦分布的干涉条纹. 当需要测量图像传感器在不同空间频率上的调制传递系数时,只需更换不同空间频率的正弦模板即可. 由于每次测量时正弦模板的空间频率都是固定不变的,因此这种测量方法实现简易测量的同时也提高了测量的可重复性.

正弦模板可以采用正弦光栅来实现. 正弦光栅的获得可以有多种方法,其中一种方法就是利用全息干版对干涉仪产生的具有一定空间频率且光强呈正弦分布的线状图样进行记录. 全息干版的作用相当于一个线性变换器,它把曝光期间内的人射光强线性地变换为显影后负片的振幅透过率. 图 3 是负片的  $t-E$  曲线,横坐标  $E$  表示曝光量,纵坐标  $t$  表示振幅透过率<sup>[6]</sup>. 若将图中标注的部分近似认为是负片  $t-E$  曲线的线性部分,同时假设全息干版具有足够高的分辨率,则在曝光量等于零时,正弦光栅(正片)的振幅透过率约为 0.

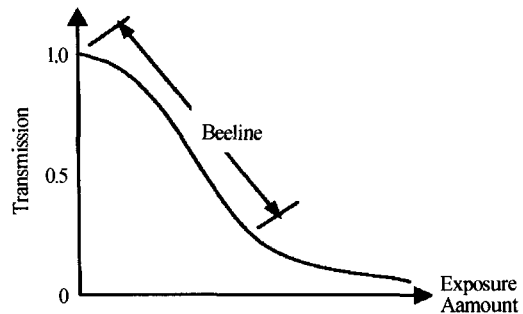


图 3 负片的  $t-E$  曲线  
Fig. 3 The curve of transmission-exposure Amount of negative

当均匀分布的平行光垂直照射在正弦光栅上时,从正弦光栅出射的光的光强极小值约为 0,由式(2)可计算出此时输入图像传感器的正弦函数的对比度为

$$C_i = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{I_{max} - 0}{I_{max} + 0} = 1 \quad (7)$$

由前面的分析可知,此时的调制传递系数为

$$MTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (8)$$

由于干涉条纹投射法是直接利用干涉仪,通过精确控制两反射镜之间的夹角来获得所需要空间频率的正弦条纹,即正弦条纹的空间频率是将两反射镜之间的夹角代入式(5)计算得出的,因此要求的实验精度应很高. 而且当重复实验时,不可能使两平面镜之间的夹角与上次实验完全相同,从而不可能产生频率完全相同的正弦条纹.

而正弦模板法与干涉条纹法不同,它是通过更换不同空间频率的正弦模板,从而达到产生不同空间频率的正弦条纹的目的.模板可以通过很多途径获得,若采用全息法制造,并不需要精确控制两相干波面的夹角,而只需在一定的角度范围内,任意制造一组栅距不同的正弦光栅,并分别用仪器精确读出正弦光栅每毫米的线数,就可利用该组正弦光栅模板测量出图像传感器在不同空间频率下的调制传递系数,其空间频率的确定是通过仪器标示.而且只要产生一组正弦光栅母板,就可以复制出许多子板,这对以后实验是很有帮助的.

这样,正弦模板法就可以避免干涉条纹投射法实验中两反射镜之间的夹角控制难的问题,不仅同一组正弦模板可以重复实验,而且实验的可重复性要比干涉条纹投射法好.

### 3 实验结果及数据处理

为了证实正弦模板法测量图像传感器调制传递函数的可行性,通过实验对该方法进行了验证.由于实验条件的限制,模板选用了更易获得的高对比度矩形光栅做了近似实验,图像传感器则选用美光 130 万像素的 CMOS. 图 4 是在矩形光栅的线数为 50 l/mm 时拍摄的矩形光栅图像.

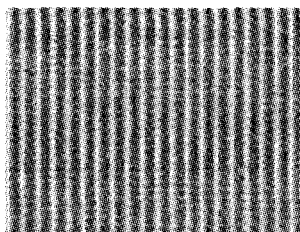


图 4 CMOS 拍摄的矩形光栅像

Fig. 4 The image of rectangle grating shot by CMOS

由于光栅在制造过程中的缺陷等因素,而且由于成像过程不可避免地存在噪声<sup>[7]</sup>.因此,有必要对图像进行去噪处理,以便降低噪声信号对测量图像传感器调制传递函数的影响,提高测量的准确度.

消除噪声的方法很多,比如低通滤波、邻域平滑等等,但这些方法除了消除噪声信息外还会影响图像的有用信息,给图像带来新的模糊<sup>[8]</sup>.为了不影响图像的有用信息,最直接有效的方法就是求图像沿栅线方向的平均值.而为了更方便地求出平均值,应保证光栅放置时其栅线方向和图像传感器的行或列保持平行.

假设光栅的栅线方向和图像传感器的列平行,则图像在列方向上所有像素的灰度值应大致相等,在像素很多的前提下,随机噪声的均值大致为零.因此求图像在列方向上所有像素灰度的平均值,并

对平均后的极大值和极小值再分别求平均值来计算调制传递函数是消除图像中的随机噪声信号的一种既简单又实用的方法.

对图 4 的矩形光栅像采用求平均值的方法来计算调制传递函数,在列方向上灰度平均后的正弦光栅像如图 5,并求出图 5 的灰度极大值的平均值为

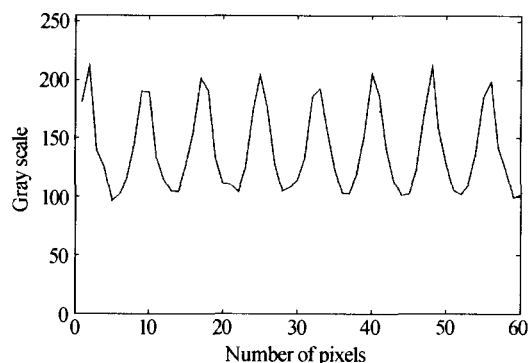


图 5 灰度平均后的矩形光栅像

Fig. 5 The averaged gray image of rectangle grating

178.26,而灰度极小值的平均值为 114.81,代入式(4),则图像传感器在空间频率为 50 l/mm 时的调制传递系数为

$$M_o = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{178.26 - 114.81}{178.26 + 114.81} \approx 0.22 \quad (9)$$

由于实验应采用正弦光栅而非矩形光栅,但是因为实验条件的限制,用高对比度的矩形光栅代替正弦光栅做了近似实验,从而近似验证了实验的可行性.

### 4 结论

本文从理论上推导了采用更为简易的正弦模板法代替干涉条纹投射法测量图像传感器调制传递函数的可行性,并从矩形光栅模板代替正弦模板的近似实验上对该方法进行了验证.实验简单、易行,而且重复性好、可靠性较高.在进行相应的数据处理时,采用了求平均值的方法,达到了稳定的结果.由于在理论推导时采用的是正弦光栅,而在实验中采用的是矩形光栅,将使测得的图像传感器的调制传递函数与采用正弦光栅测量时的调制传递函数之间存在差异.虽然是近似实验,但却给我们另一个提示:矩形光栅的制造比正弦光栅容易得多,因此,只要计算出了采用矩形光栅与采用正弦光栅测量时二者结果的差异,就可以改用更容易获得的矩形光栅进行实验,从而使实验更简单、易行.

#### 参考文献

- 1 宋敏,孙怡,李叶芳.测量 CCD 传递函数的实验系统.中国激光,1999,26(4):327~331  
Song M, Sun Y, Li Y F. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(4):327~331

- 2 江孝国,谭肇,李泽仁,等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究. 光子学报, 2003, **32**(7): 830~833  
Jiang X G, Tan Z, Li Z R, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 830~833
- 3 朱克正,赵宝升,邹远鑫,等. 光电成像系统动像光学传递函数. 光子学报, 2003, **32**(12): 1456~1460  
Zhu K Z, Zhao B S, Zou Y X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1456~1460
- 4 赵玮,赵晓铭,王红霞,等. 利用分数傅里叶变换相关实现散斑相关测量. 光子学报, 2005, **34**(3): 464~467  
Zhao W, Zhao X M, Wang H X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 464~467
- 5 苏大图,沈海龙,陈进榜. 光学测量与象质鉴定. 北京:北京工业学院出版社, 1988. 346~347  
Su D T, Shen H L, Chen J B. *Optics Measurement and Imaging Quality Appraisal*. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1988. 346~347
- 6 苏显渝,李继陶. 信息光学. 北京:科学出版社, 1999. 112~114  
Su X Y, Li J T. *Information Optics*. Beijing: Science Press, 1999. 112~114
- 7 李景镇,金世荣. 成像空间自由度与调制传递函数. 光子学报, 1997, **26**(4): 379~383  
Li J Z, Jin S R. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(4): 379~383
- 8 王婉丽,江孝国,吴廷烈. 台阶法测量 CCD 成像系统 MTF 的数据处理方法. 光电子激光, 2002, **13**(2): 173~175  
Wang W L, Jiang X G, Wu T L. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2002, **13**(2): 173~175

## Measuring Modulation Transfer Function with Mask for Imaging Sensor

Lu Jin, Chen Weimin, Cen Junbo

*Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044*

Received date: 2004-08-26

**Abstract** Modulation transfer function is a powerful tool to evaluate the imaging performance of optics system. In order to expediently evaluate imaging quality of imaging sensor, a new method using sine mask to measure modulation transfer function is presented, which is based on the interferential fringe measurement method. The sine pattern generated by sine mask is directly projected on the imaging sensor, and the sine image is achieved. Then the modulation transfer function can be calculated. The approximate experiment is carried out, making use of rectangular grating which spatial frequency is 25 l/mm. The approximate modulation transfer coefficient is obtained with the corresponding data processing technology. The result indicates that such method is agreeable.

**Keywords** Modulation transfer function; Imaging sensor; Sine template measurement; Interferential fringe measurement



**Lu Jin** was born on November 12, 1980, received Bachelor's Degree in Department of Optoelectronic Engineering from Chongqing University in 2003. Currently, she is a master in Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University. Her research area mainly focuses on optical design and image quality evaluation.