

文章编号:1007-2780(2022)10-1302-08

非矩形像素金属网格触控屏上莫尔纹的 仿真和分析

桑胜田*, 苏渝阳, 夏磊, 于涛, 王治乐
(哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:在利用计算液晶显示器子像素透过率矩阵来仿真和分析金属网格触控屏上产生的莫尔纹时,如果液晶显示器的子像素形状为非矩形的非标准形状,则会因为存在较大的形状误差而出现算法预测结果的准确度偏低的问题。为了解决该问题,提高算法预测结果的可靠性,本文针对一种具有特定形状的非矩形子像素液晶显示触控屏,通过改进子像素形状的生成算法,利用计算机模拟生成更加接近真实形状的子像素形状图形并扫描计算其透过率矩阵,再将得到的莫尔纹仿真图案在频域进行邻域滤波和低通滤波等处理得到反映莫尔纹可见度的特征频率,生成了以金属网格参数作为自变量的莫尔纹可见度预测表,并结合实验得到的判断频率来给出莫尔纹可见度的预测结果。实验结果表明,以 $2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 作为判断频率时,改进后算法的整体匹配率从 76.4% 提高到 79.5%,可用的匹配率从 67.57% 提高到 84.51%,算法的准确度和可靠性得到了显著的提高,能够为金属网格触控屏的生产厂家提供更可靠的预测结果。

关键词:莫尔纹;液晶显示器;金属网格触控屏;二维傅里叶变换

中图分类号:TN942 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0197

Moire simulation and analysis on non-rectangular sub-pixel metal mesh touch screen

SANG Sheng-tian*, SU Yu-yang, XIA Lei, YU Tao, WANG Zhi-le

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: When the moire pattern on the metal grid touch screen is simulated and analyzed by the sub-pixel transmittance calculating matrix of LCD, if the sub-pixel shape of LCD is non-standard non rectangular shape, the accuracy of algorithm prediction results will be low because of the large shape error. In order to solve this problem and provide the reliability of algorithm prediction results, this paper aims at a non rectangular sub-pixel LCD touch screen with specific shape, by improving the generation algorithm of sub-pixel shape, the computer simulation is used to generate sub-pixel shape graphics closer to the real shape, scan and calculate its transmittance matrix. Then, the obtained moire simulation pattern is processed by neighborhood filtering and low-pass filtering in the frequency domain to obtain the characteristic frequency reflecting the moire visibility. A moire visibility prediction table with metal mesh parameters as independent variables is generated, and the prediction results of moire visibility are given in combination with the judgment frequency obtained from the

收稿日期:2022-06-14;修订日期:2022-07-06.

基金项目:航空科学基金(No. 20160177007)

Supported by Aeronautical Science Foundation of China(No. 20160177007)

*通信联系人, E-mail: stsang@hit.edu.cn

experiment. The experimental results show that when $2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ is used as the judgment frequency, the overall matching rate of the improved algorithm is increased from 76.4% to 79.5%, and the available matching rate is increased from 67.57% to 84.51%. The accuracy and reliability of the algorithm are significantly improved, which can provide more reliable prediction results for the manufacturers of metal grid touch screen.

Key words: moire pattern; liquid crystal display; metal mesh touch screen; Fourier transformation

1 引言

随着显示技术的发展和智能终端的普及,触控设备的使用越来越普遍^[1]。在触控屏显示技术中,由于触控板和显示器的叠加而引起的莫尔纹问题一直是近年来研究的热点^[2-3]。在触控显示技术的发展过程中,由于过去主流触控产品所使用的氧化铟锡材料不可再生,新兴的金属网格触控显示屏逐渐成为了主流^[4]。金属网格触控屏使用金属网格作为触控板的材料,设计和制造都相对容易^[5]。

有关莫尔现象的研究分布在物理与显示等诸多领域^[6-7],与显示技术相关的莫尔纹研究兴起于21世纪初。2009年,Byung等利用图像处理技术研究了液晶显示器(LCD)上出现的莫尔纹问题^[8]。2014年,Seok等提出了一种仿真和分析显示系统中莫尔纹问题的算法,这种算法通过计算各个光学传输层透过率函数的乘积与点扩散函数的卷积来仿真莫尔纹。相比于光线追迹的方法,这种方法运算速度更快,但是不能处理有复杂结构的光学层存在的情况^[3]。在本文的研究中,金属网格的线宽只有 $4\text{ }\mu\text{m}$,而间距却有 $200\text{ }\mu\text{m}$ 左右,只能用矩形函数来表达,利用这种方法复杂度较高,运算非常耗时。2015年,Chen等利用空间频率的概念研究了金属网格触控屏上的莫尔纹问题,这种方法能够用来判断莫尔纹的空间周期,但是无法仿真莫尔纹的图案^[9]。2016年,Pournoury等人利用人眼对比度函数(CSF)作为空间滤波器分析了金属网格触控屏上莫尔纹的可见度,并用仿真图案的标准差大小作为评判莫尔纹可见度的指标^[10]。这种方法把显示器子像素近似为矩形来处理,无法处理非矩形子像素的情况。2018年,京东方公司的Xie等人利用惠更斯菲涅尔衍射原理来仿真和分析金属网格触控屏上出现的莫尔纹,并指出图案对比度越大,空间频率越低,莫尔纹可见度越高^[11]。同年,Victor

等提出利用优化金属网格的参数(网格夹角和间距)的方式来降低莫尔纹的可见度并筛选出可见度最低的网格参数,这种方法同样是把子像素近似为矩形来处理^[12]。

在之前的研究中,我们提出了利用计算显示平面子像素受金属网格遮挡后的透过率矩阵来仿真金属网格触控屏上莫尔纹的方法,同样也是把子像素看作矩形^[13]。当子像素形状与矩形差异较大时,利用近似为矩形来处理的方法会带来较大的误差。为了提高仿真分析的精度和算法的可靠性,本文基于我们之前的工作,研究了子像素不可近似为矩形时金属网格触控屏上的莫尔纹的仿真算法和可见度量化分类方法。

2 莫尔纹的仿真

国内外相关的研究人员已经研究出了多种显示屏上莫尔纹的仿真方法,常用的有基于透过率计算的仿真方法^[1,13]、光线追迹法^[14-15]和衍射积分法^[11,16-17]等。光线追迹法利用追踪光线在显示器各层的传播情况来仿真莫尔纹图案;基尔霍夫衍射积分法和菲涅尔衍射积分法均把像素平面和触控层看作叠加起来的单层衍射屏来计算衍射后的光强分布;基于透过率计算的仿真方法则不考虑光的衍射,把像素平面和触控层中透光的部分看作透过率为1,不透光的部分看作透过率为0,通过计算子像素的透过率来仿真莫尔纹图案。本文选用处理简单且具有较高运算效率的基于透过率计算的仿真方法来进行仿真和分析,通过计算机模拟生成非矩形子像素受金属网格遮挡的图像并扫描像素点来计算子像素的透过率矩阵,从而得到仿真莫尔纹图案,并据此在频域进行分析判断莫尔纹的可见度。

如图1所示,1个像素由3个子像素——红色滤光片(RCF)、绿色滤光片(GCF)和蓝色滤

光片(BCF)组成,图 1(c)、(d)为示意图(a)、(b)对应的实物显微镜照片,图 1(c)为子像素形状可近似为矩形的液晶显示器像素平面的代表性照片,图 1(d)为子像素形状为非矩形的液晶显

示器像素平面的代表性照片。液晶显示器的子像素形状除了这两种之外还有斜矩形形状,本文只针对图 1(b)所示形状的非矩形子像素金属网格触控屏进行研究。

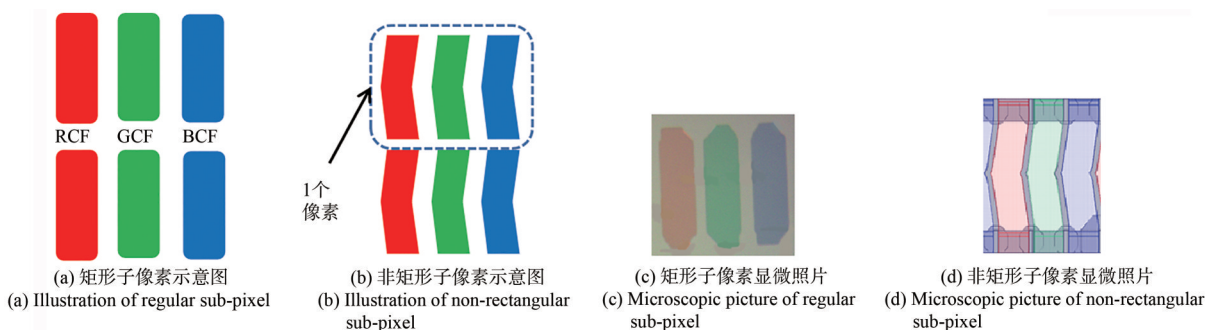


图 1 子像素为非矩形的液晶显示屏

Fig. 1 LCD with non-rectangular sub-pixels

2.1 非矩形子像素图案的生成

非矩形子像素的形状虽然不是矩形,但是它们组成的像素平面也是周期性图形,利用计算机生成单个周期的图形,然后按周期重复就可以模拟生成像素平面的图案。在利用计算机生成如图 1(b)所示的单个周期图形的时候所需的参数和步骤如图 2 所示。①表示旋转操作,②表示剪切操作,③表示对称复制操作,④表示拼接操作。

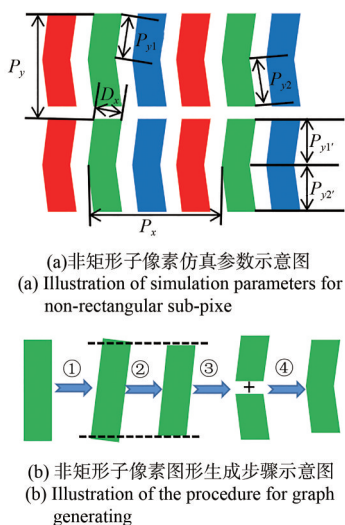


图 2 仿真所需的参数和图形生成步骤

Fig. 2 Parameters for moire pattern simulation and the procedure for graph generating

在生成图 1(b)所示形状的子像素时,先生成一个矩形形状的子像素,然后利用旋转矩阵得到

旋转后的矩形子像素,再进行剪切,将剪切得到的图形进行竖直翻转并拼接就得到了最终的图形。上述过程如图 2(b)所示,使用到的旋转矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, \alpha = \arccos(P_{y1'}/P_{y1}). \quad (1)$$

2.2 透过率矩阵的计算

在金属网格触控屏上,像素平面与金属网格平面叠加(网格放置在上层)会导致子像素受到遮挡,透过率会降低,遮挡严重且形成周期性图案会产生人眼可见的莫尔纹,本文通过计算受遮挡像素的透过率来模拟莫尔纹。子像素的透过率用式(2)计算^[13]:

$$\begin{cases} t_R(i,j) = 1 - \frac{S_{ij}}{S_{RCF}} \\ t_G(i,j) = 1 - \frac{S_{ij}}{S_{GCF}} \\ t_B(i,j) = 1 - \frac{S_{ij}}{S_{BCF}} \end{cases}, \quad (2)$$

其中 $S_{i,j}$ 是第 i 行 j 列子像素受金属网格遮挡的面积, S_{GCF} 、 S_{RCF} 和 S_{BCF} 分别是 GCF、RCF 和 BCF 的面积, $t_R(i,j)$ 、 $t_G(i,j)$ 和 $t_B(i,j)$ 表示 GCF、RCF 和 BCF 的透过率。子像素透过率计算的方法如图 3 所示。本文中计算透过率时考虑的是正视的情况,由于在实际的金属网格触控屏中金属网格层与液晶显示器像素平面之间存在约 $200 \mu\text{m}$ 的间隔,当以一定角度斜视时,金属网格相对像素平

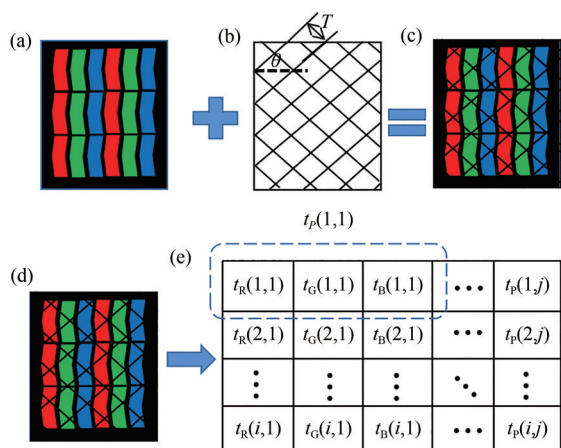


图3 子像素透过率矩阵的计算示意图。(a)非矩形像素平面示意图;(b)金属网格参数示意图;(c),(d)像素平面的叠加示意图;(e)子像素透过率矩阵示意图。

Fig. 3 Schematic for the calculation procedure of sub-pixel transmittance matrix. (a) Illustration of black matrix for non-rectangular pixel; (b) Illustration of metal mesh parameters; (c), (d) Illustration of the superposition for pixel plane; (e) Transmittance matrix schematic for non-rectangular sub-pixel.

面的遮挡情况与正视时会有轻微位移,位移的大小视具体显示器的参数和斜视角度不同大约在 $100 \mu\text{m}$,对莫尔纹图案的影响通常较小。

仿真时金属网格的参数为夹角 θ 和周期 T (图 3(b)),网格线宽为 $4 \mu\text{m}$ 。在得到如图 3(e)所示的透过率矩阵后,将透过率等比例放缩到 $0 \sim 255$ 用来控制电脑显示器像素值就可以仿真莫尔纹。因人眼对绿色最为敏感,故仿真绿色图片进行分析。仿真绿色图案时,只需计算由 $t_G(i,j)$ 组成的透过率矩阵。利用此方法仿真得到的莫尔纹图片如图 4 所示。 θ 表示金属网格的夹角, T 表示金

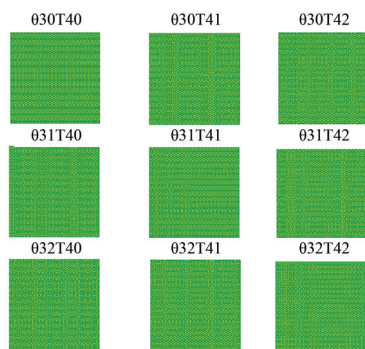


图4 莫尔纹仿真图片

Fig. 4 Simulated moire patterns

属网格的周期。仿真时使用的液晶显示屏参数为: $P_x = P_y = 100 \mu\text{m}$, $P_{y1} = P_{y2} = 42 \mu\text{m}$, $P_{y1'} = P_{y2'} = 42 \mu\text{m}$, $D_x = 30 \mu\text{m}$ 。

3 莫尔纹可见度的预测方法

在实际观测实验中,被观测员判定为高可见度的莫尔纹图案具有空间周期大且对比度较高的特征。在频谱图中,空间频率的大小和幅值分别能反映空间周期和对比度,因此可以从频域来分析莫尔纹的可见度。本文首先对仿真得到的莫尔纹图案进行二维傅里叶变换,然后进行频域滤波,提取特征频率 f_e 作为莫尔纹可见度评判的参考指标。在进行莫尔纹可见度的分类时,引入由观察员给出的判断频率作为基准,分类方法如式(3)所示:

$$\text{JR} = \begin{cases} \text{OK}, f_e > 2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1} \\ \text{NG}, f_e \leq 2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

其中, JR 为分类结果,判断频率为 $2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$; OK 表示莫尔纹可见度较低,达到可用的程度; NG 表示莫尔纹的可见度较高,观察员认为会影响视觉体验,为不可用的程度。判断频率的值一般根据显示器像素尺寸的不同取值范围为 $1.7 \sim 2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,显示器像素尺寸越小,判断频率越高。由于实际生产时只关心匹配的触控屏是否可用(即莫尔纹的可见度是否足够轻微),匹配结果只有 OK 和 NG 两种。通过频谱分析发现,在低频区出现的高幅值频率分量对莫尔纹的可见度影响较大,可以利用一个特征频率来反应莫尔纹的可见度。为了综合考虑高幅值频率分量对莫尔纹可见度的影响,本文中特征频率取为低频区(空间频率小于 $3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)幅值最大的频率 f_m 和幅值次大的频率 f_{sm} 中的小值。利用快速傅里叶变换得到的空间频谱中高频区、0 频分量和杂频会干扰特征频率的提取,因此需要进行低通滤波、去 0 频和去杂频的滤波操作,滤波流程如图 5 所示。这里使用的低通滤波器截止频率为 $3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$,去杂频时使用一个 3×3 的滤波器进行领域滤波,滤波器输出频率 f_o 为:

$$f_o = \begin{cases} f_5, f_5 > \max\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9\} \\ 0, f_5 \leq \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9\} \end{cases} \quad (4)$$

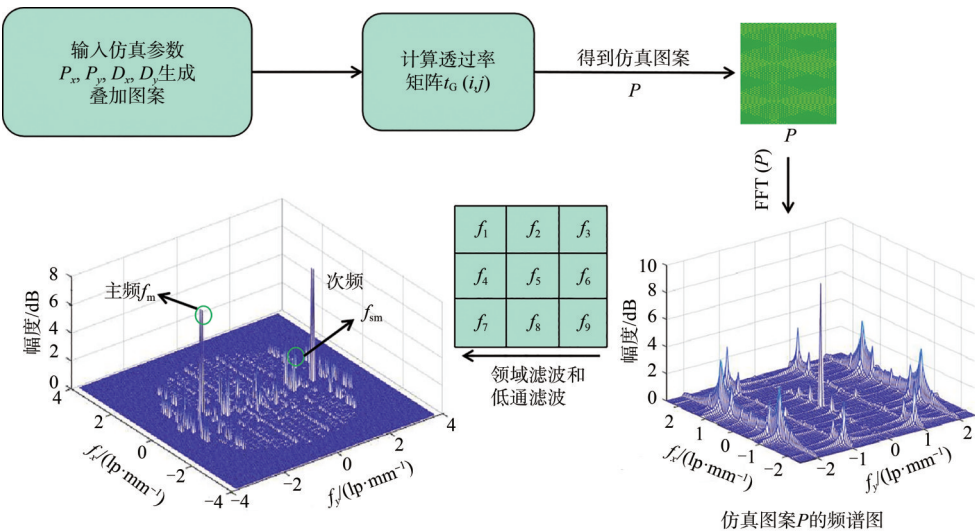


图 5 特征频率的提取

Fig. 5 Extraction procedure of characteristic frequency

4 实验结果及分析

实验用的显示器参数如表 1 所示。采用将子像素近似为矩形的算法(下文均简称为原算法)进行仿真时,显示器的参数只有 P_x 、 P_y 、 D_x 和 D_y 四个。实物匹配结果和前后两种算法的仿真结

果如图 6~8 所示,图中的 T (单位为 $5\text{ }\mu\text{m}$)表示金属网格的周期, θ (单位为 $^\circ$)表示网格的夹角。金属网格的角度参数范围为 $25^\circ\sim 38^\circ$,步长为 1° ;金属网格的周期范围为 $30\sim 52$,步长为 1。图 6 所示的实物匹配结果是由观察员在距离显示屏 25 cm 处观察得到的。图 7、8 中的数值为反应莫尔纹可见度的特征频率 f_c (单位为 $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$),颜色由红到绿表示特征频率由低到高。因为空间周期的大小与空间频率的数值成反比关系,故特征频率越高表示莫尔纹可见度越低,用绿色表示;特征频率越低表示莫尔纹可见度越高,用红色或者橙黄色表示。图中用渐变色来反应莫尔纹可见度的变化趋势,方便对实验数据进行分析。

对比图 7 原算法得到的莫尔纹可见度预测表

表 1 实验用显示器的参数

Tab. 1 Parameters of experimental display

原算法显示器的 输入参数/ μm	新算法显示器的 输入参数/ μm
$P_x=198, P_y=198,$ $D_x=71, D_y=160$	$P_x=195, P_y=191$ $D_x=52, P_{y1}=160$ $P_{y2}=71, p_{y1}=74$ $p_{y2}=70$

$\theta \backslash T$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
25	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG
26	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG
27	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG
28	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG
29	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG
30	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG
31	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG
32	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG
33	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	OK	OK
34	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	OK
35	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	OK
36	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG
37	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG
38	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG	NG	NG	NG	NG

图 6 实物匹配结果

Fig. 6 Practical matching results

$\theta \backslash T$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
25	0.60	1.71	1.27	0.96	0.60	0.36	0.35	0.51	0.74	1.03	1.28	1.50	1.72	1.94	2.10	2.10	2.15	2.14	2.00	2.14	2.20	0.60	0.43
26	0.80	2.32	1.28	0.90	0.52	0.20	0.16	0.46	0.72	1.01	1.23	1.50	1.72	1.95	2.13	2.21	2.20	2.21	2.19	2.25	2.24	2.27	0.30
27	2.06	1.68	1.28	0.90	0.54	0.21	0.15	0.41	0.70	0.97	1.25	1.48	1.70	1.92	2.15	2.26	2.26	2.27	2.30	2.32	2.31	2.30	0.32
28	2.08	2.10	1.31	0.92	0.61	0.35	0.32	0.50	0.76	1.02	1.25	1.52	1.74	1.96	2.14	2.36	2.38	2.05	2.37	2.36	0.81	0.61	0.43
29	1.97	1.96	1.38	1.01	0.74	0.50	0.49	0.63	0.85	1.05	1.31	1.53	1.75	1.96	2.18	2.36	2.42	2.43	2.41	2.35	0.92	0.74	0.55
30	1.86	1.78	1.42	1.14	0.86	0.72	0.71	0.81	0.98	1.15	1.40	1.61	1.82	2.03	2.21	2.43	1.95	2.47	2.36	1.23	1.01	0.86	0.75
31	1.75	1.77	1.54	1.25	1.05	0.89	0.86	0.97	1.08	1.27	1.45	0.10	1.90	2.07	2.28	2.44	2.46	2.34	1.54	2.11	1.18	1.05	0.91
32	1.63	1.66	1.69	1.42	1.20	1.11	1.04	1.14	1.23	1.41	1.57	1.76	1.05	2.15	2.36	0.65	2.38	2.26	1.69	1.49	1.35	1.20	1.13
33	1.50	1.55	1.61	1.55	1.41	1.28	1.25	1.31	1.39	1.55	1.70	1.87	2.06	2.25	2.40	2.41	2.27	2.14	2.01	1.66	1.50	1.41	1.30
34	1.39	1.43	1.51	1.65	1.58	1.46	1.47	1.49	1.55	1.70	1.83	2.00	2.17	2.35	0.10	2.35	2.37	2.17	1.97	1.80	1.70	1.58	1.49
35	1.28	1.32	1.45	1.55	1.66	1.66	1.65	1.66	1.72	1.86	1.98	2.12	2.29	2.42	2.41	2.25	2.10	2.33	2.16	2.00	1.86	1.75	1.71
36	1.15	1.27	1.35	1.45	1.57	1.70	1.83	1.84	1.93	2.02	2.13	2.26	2.41	2.23	2.32	2.16	2.00	1.85	2.30	2.16	2.03	1.98	1.88
37	1.04	1.16	1.23	1.36	1.54	1.66	1.76	1.88	2.02	2.17	2.26	2.37	2.46	2.46	2.25	2.09	2.23	2.35	1.60	2.36	2.25	2.15	2.08
38	0.93	1.05	1.15	1.32	1.46	1.58	1.73	1.86	1.99	2.10	2.24	2.33	2.44	2.40	1.79	1.90	2.02	2.20	2.36	1.40	2.43	2.34	2.26

图7 原算法特征频率的计算结果

Fig. 7 Calculation results of the earlier algorithm

$\theta \backslash T$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
25	1.72	1.33	0.91	0.55	0.29	0.30	0.57	0.81	1.10	1.36	1.62	1.84	2.11	2.19	2.06	1.72	1.46	1.18	0.91	0.70	0.45	0.29	0.25
26	1.70	1.30	0.87	0.54	0.15	0.18	0.51	0.81	1.07	1.36	1.63	1.86	2.08	1.05	2.28	1.70	1.43	1.14	0.87	0.65	0.38	0.15	2.44
27	1.71	1.33	0.89	0.53	0.21	0.25	0.51	0.82	1.11	1.38	1.62	1.84	2.11	2.33	2.35	2.36	1.44	1.15	0.89	0.67	0.39	0.21	0.18
28	1.77	1.31	0.96	0.63	0.40	0.39	0.61	0.85	1.12	1.38	1.66	1.88	2.10	2.32	2.42	2.47	1.49	1.20	0.96	0.72	0.54	0.40	0.39
29	1.84	1.39	1.07	0.78	0.56	0.57	0.74	0.96	1.20	1.46	1.68	1.94	2.16	2.38	2.53	1.84	1.56	1.29	1.07	0.85	0.71	0.56	0.54
30	1.88	1.50	1.17	0.96	0.79	0.78	0.89	1.08	1.31	1.55	1.76	1.97	2.18	2.48	2.20	1.93	1.66	1.41	1.17	1.02	0.85	0.79	0.76
31	1.77	1.63	1.33	1.10	1.01	0.96	1.08	1.23	1.43	1.61	1.50	2.05	2.26	2.57	2.27	2.02	1.77	1.55	1.33	1.15	1.06	1.01	0.97
32	1.66	1.72	1.51	1.31	1.19	1.14	1.25	1.39	1.57	1.73	1.96	0.91	2.75	2.65	2.39	2.15	1.87	1.70	1.51	1.35	1.23	1.19	1.19
33	1.55	1.61	0.11	1.47	1.37	1.39	1.42	1.54	1.71	1.86	2.07	2.26	2.45	0.10	2.51	2.23	2.01	1.82	1.65	1.56	1.44	1.37	1.37
34	1.43	1.51	1.60	1.69	1.59	1.57	1.63	1.71	1.86	1.99	2.15	2.66	2.51	2.71	2.35	2.39	2.19	2.01	1.85	1.72	1.61	1.59	1.55
35	1.32	1.40	1.55	1.67	1.79	1.75	1.80	1.87	2.01	2.14	2.28	2.41	2.43	2.46	2.51	2.05	2.36	2.20	2.06	1.94	1.46	1.36	1.30
36	1.22	1.35	1.46	1.58	1.71	1.85	1.98	2.04	2.17	2.28	2.42	2.16	2.18	2.22	2.33	2.43	1.55	1.66	1.57	1.44	1.31	1.25	1.17
37	1.10	1.25	1.36	1.49	1.68	1.82	1.90	2.06	2.19	2.33	1.96	1.91	1.93	2.00	2.10	2.21	1.75	1.60	1.45	1.32	1.24	1.12	1.07
38	1.00	1.15	1.29	1.47	1.60	1.75	1.90	2.04	2.17	1.88	1.72	1.67	1.68	1.76	1.88	2.05	1.67	1.50	1.35	1.20	1.12	1.00	0.94

图8 新算法特征频率的计算结果

Fig. 8 Calculation results of the new algorithm

和图 6 观察人员给出的实验结果,可以看出两者给出的莫尔纹可见度较低的区域(颜色为绿色的区域)在整体位置上有较大的重叠部分,这说明原算法对子像素为非矩形的情况有一定的适用性。但原算法给出的预测结果中在右下角部分存在较大的莫尔纹可见度较低的绿色区域,这与实验结果不相符合,说明原算法存在较大的误差。对比图 8 新算法给出的莫尔纹可见度预测表和图 6 观察人员给出的实验结果可以发现,两者给出的莫尔纹可见度较低的区域重叠的部分更大,而且新算法给出的预测结果右下角不再为莫尔纹可见度较低的绿色,而是可见度较高的橙色或者黄色,这充分说明了新算法针对子像素为非矩形的情况具有更高的准确度和可靠性。图 7 和图 8 中颜色异常突出的点我们称之为奇异点,奇异点的产生是由测量误差、形状误差和算法本身存在一定误差三者综合作用的结果。奇异点

的数量相对较少(图 7 中 322 个点只有 6 个奇异点,占比只有 1.86%;图 8 中奇异点占比只有 1.55%),不影响根据预测结果得到所需的金属网格设计参数。

为了量化两种算法和实物匹配结果的吻合度并比较两种算法的性能,需要计算两种算法和实物匹配结果的匹配率。反映吻合度的匹配率有整体匹配率和可用匹配率。整体匹配率是指仿真分类结果与实物匹配结果一致的数量占整体仿真参数总数的比例,可用匹配率是指仿真分类结果中可用的部分与实物匹配结果一致的数量占实物匹配结果中所有可用总数的比例,其计算公式为:

$$C=\frac{B}{A}\times 100\%,\tag{5}$$

式中 A 为实物匹配结果中被判定为莫尔纹轻微(即匹配结果中“OK”)的点的数量, B 为算法给出

的莫尔纹可见度预测表中同时满足大于判断频率且在实物匹配结果中的对应位置也为“OK”的点的数量。

可用匹配率反映了预测结果给出的可用点的可信度大小,其值越接近于1,可信度越高。在实际生产匹配显示屏的触控屏时,多数情况没有显示器实物,无法得到如图6所示的实物匹配结果,这时要找到可用的金属网格参数完全依赖于仿真预测的结果,因此生产商更看重可用匹配率。在判断频率为 $2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时,两种算法的整体匹配率和可用匹配率如表2所示。从表2可以看出,新算法的整体匹配率从76.4%提高到79.5%,可用匹配率也从67.57%提高到84.51%,两种评价仿真吻合度的指标均得到了提高,尤其是可用匹配率提高幅度较大,这说明新算法相比于原算法的仿真准确度更高,可靠性更强,能够更好地指导生产。同时新算法相比于原算法在复杂度上没有提升,运行时间与原算法相近。在实际工程应用时,只要求根据预测结果找到

相邻的4个点取均值作为设计金属网格的设计参数,考虑到测量误差和观察员的主观误差,可用匹配率超过80%就可以保证能够找到可用的金属网格设计参数。

5 结 论

在利用子像素透过率计算来仿真和分析金属网格触控屏上出现的莫尔纹的算法中,非矩形的子像素被近似当作矩形处理,这种近似在预测子像素形状与矩形差异较大的金属网格触控屏上出现的莫尔纹可见度时误差较大。本文针对其中一种非矩形子像素触控屏,利用计算机模拟生成与原子像素形状更加接近的图形来提高算法的匹配率。在利用二维傅里叶变换得到仿真图片的空间频谱并进行滤波后,得到了特征频率来反映莫尔纹的可见度,通过比较特征频率和判断频率对莫尔纹的可见度进行分类。实验结果表明,以 $2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 作为判断频率,新算法的整体匹配率从76.4%提高到79.5%,可用匹配率从67.57%提高到84.51%,改进后算法的准确度和可靠性得到了明显的提高,尤其是对指导实际生产更有意义的可用匹配率得到了显著的提高,这对金属网格触控屏的生产厂家利用算法来寻找匹配的金属网格触控屏有重要意义。

表 2 两种算法的对比

Tab. 2 Comparison of two algorithms

匹配率	原算法结果/%	新算法结果/%
整体匹配率	76.4	79.5
可用匹配率	67.57	84.51

参 考 文 献:

[1] 林述锋,沈田子.氧化石墨烯液晶的光电特性与显示应用[J].液晶与显示,2020,35(7):733-740.

[2] LIN S F, SHEN T Z. Electrical-optical properties of graphene oxide liquid crystal and its applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 733-740. (in Chinese)

[3] JIN L L, YANG Z Z, LIU H, *et al.* Color moiré of a high dynamic range dual-panel LCD [J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(5): 1105-1116.

[4] BYUN S J, BYUN S Y, LEE J, *et al.* An efficient simulation and analysis method of moiré patterns in display systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3128-3136.

[5] AMIDROR I. *The Theory of the Moiré Phenomenon* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

[6] WHEATLEY J, LIU T, VAN DERLOFSKE J, *et al.* Greener displays through integrated optics: display backlights using OneFilm [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, 43(1): 659-662.

[7] WU B, ZHENG H H, LI S F, *et al.* Evidence for moiré intralayer excitons in twisted WSe₂/WSe₂ homobilayer superlattices [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 166.

[8] CADARSO V J, CHOSSON S, SIDLER K, *et al.* High-resolution 1D moirés as counterfeit security features [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(7): e86.

[9] JOO B Y, SHIN D H. Simulations of pixel moirés in the liquid crystal display with image processing technique [J]. *Displays*, 2009, 30(4/5): 190-194.

[10] CHEN C C, CHEN C Y, HUANG S Y. Metal mesh design for high-ppi LCD application [J]. *SID Symposium Di-*

- gest of *Technical Papers*, 2015, 46(1): 805-808.
- [11] POURNOURY M, ZAMIRI A, KIM T Y, *et al.* Numerical evaluation of moiré pattern in touch sensor module with electrode mesh structure in oblique view [C]//*Proceedings of SPIE 9770, Advances in Display Technologies VI*. San Francisco: IEEE, 2016: 97700B.
- [12] XIE X D, YANG H, SHAO X B, *et al.* Moire research and simulation of OGS metal mesh touch sensor [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 1889-1892.
- [13] YURLOV V, KIM T Y, HAN K, *et al.* Visibility minimization of the moiré pattern on a display screen by optimizing geometrical parameters using an F/θ plot [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(10): 2562-2573.
- [14] SU Y Y, WANG Z L, AN D. Simulation of moire pattern based on transmittance calculation of LCD metal mesh touch panel [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(8): 620-631.
- [15] POURNOURY M, ZAMIRI A, YURLOV V, *et al.* Minimization of moiré effect generated by a double-layered metal mesh on top of the R-G-B optical source [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102401.
- [16] INSIDEOPTICS Co., Ltd. RAYWIZ user manual 2013 [EB/OL]. <http://www.insideoptics.com>.
- [17] CHEN Y M, CHE C C, CHEN J S, *et al.* Simulation and analysis of moiré effect based on LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 2083-2086.

作者简介:



桑胜田(1975—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事数字集成电路、光电测量与信号处理等方面的研究。E-mail: stsang@hit.edu.cn