

《大学物理实验(III)》课程完整报告

学院：物理科学与工程技术学院专业：光信息年级：2014 级

实验人姓名（学号）：罗鑫（14342057） 参加人姓名（学号）：罗鑫（14342057）

日期：上午[√]下午[]

室温： °C 湿度： %

实验 C7 基于空间光调制器的光学实验

摘要

本实验我们利用空间调制器(SLM)测量了 SLM 的振幅调制曲线通过加载不同灰度的图像. 通过搭建光学平台,测量了不同焦距不同缩小放大倍数下畸变效果,并通过计算像素来定量测量畸变的大小.同时我还利用 mathematica 软件模拟畸变的图像.接着我们利用阿贝成像原理在傅氏面上通过操作刀缝或者可变光阑实现控制空间频率来改变图像.同时我们实行了高通滤波和低通滤波以及方向滤波,并测量了一些数据.

关键词:空间调制器; 振幅调制曲线; 畸变; 阿贝成像; Mathematica 模拟; 滤波;傅立叶变换

目录

实验 C7 基于空间光调制器的光学实验	1
摘要.....	1
目录.....	1
图表目录.....	1
1 实验原理.....	3
1.1 光学系统的畸变.....	3
1.2 液晶全间光调制器的结构.....	4
1.3 基于空间光调制器的光信息处理基础实验.....	4
1.4 阿贝成像理论.....	5
2 实验分析.....	6
2.1 测量空间光调制器的振幅调制曲线.....	6
2.2 测量透镜放大缩小像的畸变.....	7
2.2.1 Mathematica 模拟实验.....	7
2.2.2 平行光入射透镜模拟.....	7
2.2.3 点光源成像.....	8
2.2.4 模拟畸变.....	9
2.2.5 图像处理.....	11
2.2.6 实验数据处理.....	12
3 验证阿贝成像原理.....	14
3.1 模拟图像.....	14
3.2 实验图像.....	16
3.3 Mathematica 模拟傅立叶变换.....	17
3.4 高通滤波和低通滤波.....	18
3.5 方向滤波.....	19
4 参考文献.....	19

图表目录

图 1 光学系统所成像畸变示意图	3
图 2 空间调制器的结果	4
图 3 阿贝成像原理	5
图 4 测量 SLM 的振幅调制曲线的光路	6
表 1 灰度与光功率读数	6
图 5 灰度与光功率曲线	6
图 6 测量透镜畸变的光路图	7
图 7 非旁轴的平行光成像	7
图 8 非旁轴下的点光源成像	8
图 9 焦距随 Y_0 的变化曲线	8
图 10 6 乘 8 的棋盘格	9
图 11 球面模型图像畸变原理	9
图 12 图像畸变示意图	10
图 13 模拟枕形畸变	10
图 14 模拟桶形畸变	11
图 15 改变放大缩小率的枕形畸变	11
图 16 取图像拐点的 MATHEMATICA 示意图	12
表 2 模拟相对畸变 Q 与 D 对应数据	12
表 3 相对畸变实验计算	13
图 17 零级光点通过模拟图	14
图 18 零级和一级光点通过模拟图	15
图 19 零级和一二级光点通过模拟图	15
图 20 透射光栅 0 级, 1 级, 2 级图像	16
图 21 128T 条纹未滤波原图像	16
图 22 128T 条纹 0 级, 1 级, 2 级图像	16
图 23 128T 条纹利用可变光阑 0 级, 1 级, 2 级图像	16
图 24 空间调制器使用的 32T 条纹的傅立叶变换图像	17
图 25 透射光栅傅立叶图像	17
图 26 128T 实验观测的图像傅立叶变换	18
图 27 低通滤波和高通滤波	18
图 28 MATHEMATICA 低通滤波高通滤波	18
图 29 方向分别为 0, 45, 90, 135 度滤波图像	19

1 实验原理

1.1 光学系统的畸变

在讨论理想光学系统的成像时，认为在一对共轭的物像平面上，其放大率是一个常数。但在实际的光学系统中，只有当视场较小时才具有这一性质，当视场较大时，像的放大率不再是常数，这将使所成的像相对于物失去了相似性。这种现象称为畸变。

畸变表现为像平面内图形的各部分与原物不成比例。例如一个垂直于光轴的平面物体，其图案如图 1a 所示，它由理想光学系统所成的像应该是一个和原物完全相似的方格，如图 1b 和(c)中的虚线所示。若远光轴区域的放大率比光轴附近小，在像平面内实际成像就如图 1b 实线所示，这现象称为桶形畸变；反之，若远光轴区域的放大率较大，则所成的像就如图 1c 实线所示，这现象称为枕形畸变。

光学系统产生畸变的原因在于主光线的球差随视场角 ω 的改变而不同，畸变在数值上通常以理想像高 Y' 和相面上实际像高 Y_z' 之差 $\delta Y_z'$ 表示：

$$\delta Y_z' = Y_z' - Y' \quad (1)$$

常用相对畸变 q 来表示畸变的大小：

$$|q| = \frac{\delta Y_z'}{Y'} \times 100\% \quad (2)$$

本实验中，理想像高由 $Y' = Vy$ 求得， V 为放大率， y 为像高，实际像高 Y_z' 由 CCD 拍摄的图像获得。

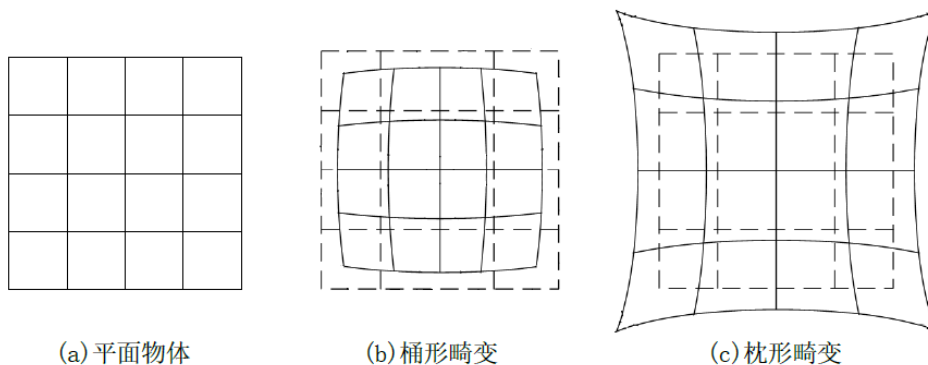


图 1 光学系统所成像畸变示意图

1.2 液晶全空间光调制器的结构

空间光调制器（SLM）由一个个周期性排列的独立像素单元组成，如图 2（a）所示。每个像素都具有图 2 所示的结构。驱动电路可以分别控制每一个像素的电压，进而控制每个像素的光线调制特性。使用过程中，将像素与 SLM 像素一致的灰度图片居中作为计算机的桌面背景即可加载至 SLM，SLM 中的驱动电路将每个像素的灰度值线性转换成驱动电压。由于 SLM 中不透明电极会阻挡一部分读出光，故 SLM 液晶面板就像一个网格，会将加载的一幅连续的图案进行分割，即空间数字化。例如单缝衍射的频谱是一维的点阵，把一个如图 2（b）所示的单缝图案加载到 SLM，单缝图案会被网格化，呈现出如图 2（c）所示的结构。故除了加载的图案会发生衍射外，网格结构也会使读出光发生衍射。用 SLM 作为光阑进行衍射实验时，其空间频谱会比实物光阑为丰富。

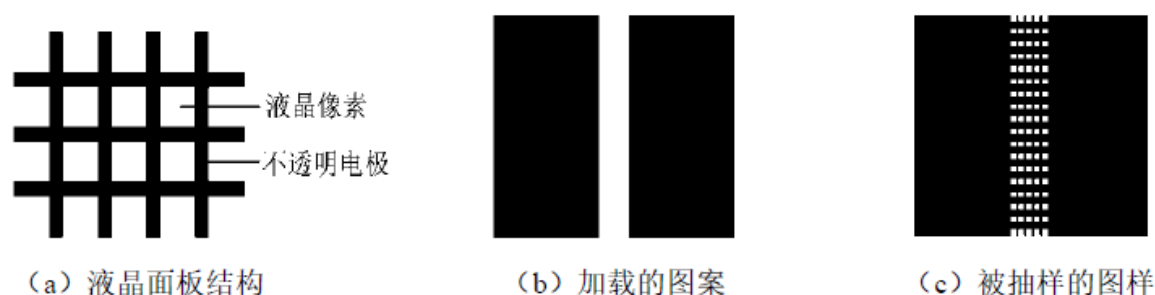


图 2 空间调制器的结果

1.3 基于空间光调制器的光信息处理基础实验

光波作为信息载体具有特别显著的优点：其一是具有极大的信息容量，其二是光波具有并行性，为信息的多路并行传输和处理提供了可能性。当今信息处理技术的核心是利用以计算机为代表的电子设备处理随时间序列变化的一维信号。对于重要性日益增长的诸如文字、图像、照相之类具有过维空间分布的图像信息，往往通过扫描和取样的方式将其转换为一维信号，由计算机处理之后再还原成二维信号。由于这种方法要处理的数据量十分巨大，加之分辨率、图像还原方法等方面的限制，已经很难同时满足图像质量和处理速度两方面的要求。因此，利用光的透射、干涉、衍射等光学现象对二维图像直接进行运算的方法就越来越受到人们的重视。称这种信息处理的方法为光学信息处理。由于信息处理过程中许多信息并行处理，且输入和输出都是直接以图像形式进行的，

不需要象计算机处理那样进行图像复原，所以其分辨率可以很高而运算时间可以极短。特别是激光（相干光）的运用，极大地促进了光学信息处理技术的发展。

1.4 阿贝成像理论

阿贝尔研究显微镜成像问题时，提出了一种不同于几何光学的新观点，他将观测物看成是不同空间频率信息的集合，相干成像过程分两步完成，如图 3 所示。第一步是入射光场经物平面 P_1 发生夫琅禾费衍射，在透镜 L 的后焦面 P_2 （即频谱面）上形成空间频谱，这是衍射所引起的“分频”作用。第二步是代表不同空间频率的各光束作为新的次波源发生干涉，在像面 P_3 上互相叠加，形成物体的像，这是干涉所引起的“合成”作用。成像的这两个步骤本质上就是两次傅里叶变换。第一步是把物面光场的空间分布变为频谱面（ P_2 ）上的空间频率分布。第二步再做一次逆变换，将空间频率分布还原到空间分布。

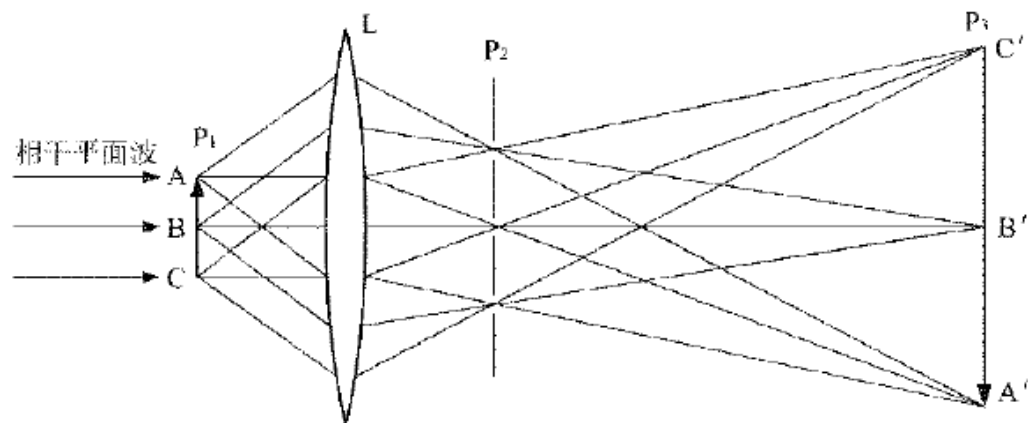


图 3 阿贝成像原理

阿贝尔成像理论不仅用于傅里叶变换阐述了显微镜成像的机理，更重要的是首次引入了频谱的概念，启发人们用改造频谱的手段来改造信息。如果在频谱面上设置各种空间滤波器，滤去频谱中的某些空间频率成分，将会使像发生变化。空间滤波就是在光学系统的频谱面上放置各种空间滤波器，去掉（或通过）某些空间频率或改变他们的振幅和相位，使二维物体的像按照要求得到改善。

2 实验分析

2.1 测量空间光调制器的振幅调制曲线

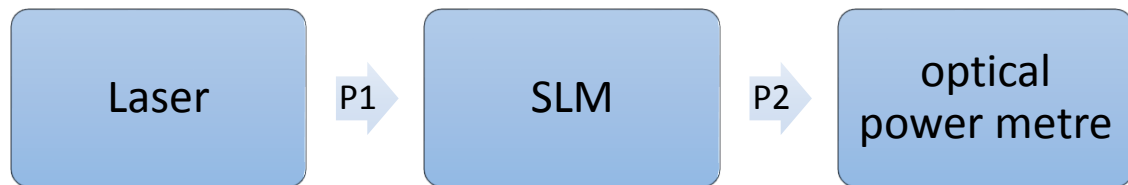


图 4 测量 SLM 的振幅调制曲线的光路

数据如下

表 1 灰度与光功率读数

灰度	光功率/ μW	灰度	光功率/ μW	灰度	光功率/ μW
3	0.2442	93	0.2235	183	0.3625
13	0.2432	103	0.1623	193	0.4999
23	0.2312	113	0.1615	203	0.8451
33	0.1876	123	0.1582	213	1.612
43	0.2104	133	0.1603	223	3.194
53	0.2087	143	0.1548	233	5.782
63	0.2214	153	0.1756	243	9.044
73	0.2553	163	0.1813	253	11.23
83	0.2442	173	0.1949		

Matlab 作图，如下

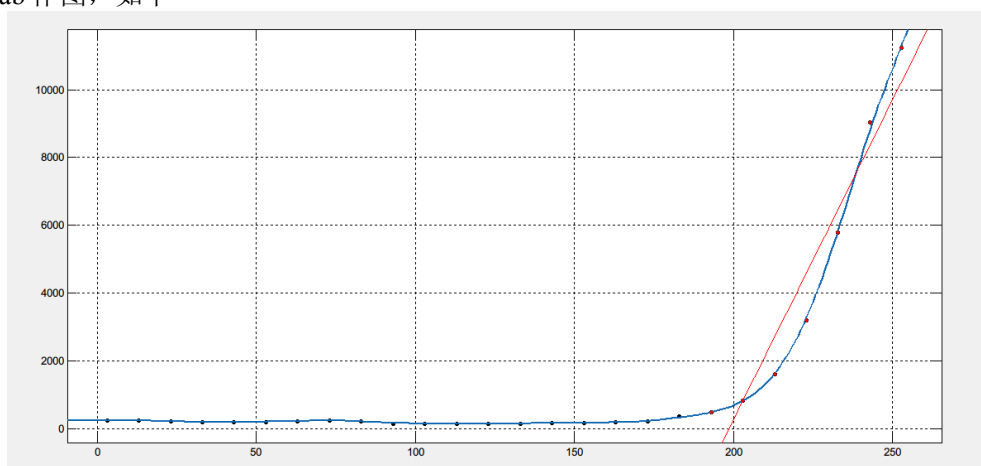


图 5 灰度与光功率曲线

说明 x 轴是灰度值，y 轴是光功率值，单位为 nW ，红色点为用于线性拟合的数据点，执行为拟合结果，方程为

$$y = p1 * x + p2, \quad p1 = 188.42 \quad p2 = -37417$$

在一定灰度范围内可以线性化处理，由于我们实验的阈值比较高，所以无法进行 s 形曲线拟合，即 logistic 曲线拟合。

2.2 测量透镜放大缩小像的畸变

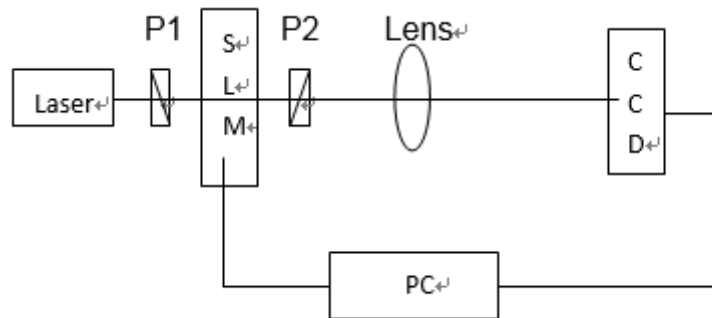


图 6 测量透镜畸变的光路图

2.2.1 Mathematica 模拟实验

由于刚刚学习了 mathematica 软件，收集了一些相应的代码，模拟出平行光与电光源非旁轴条件下成像结果，相应的代码与结果如图所示

2.2.2 平行光入射透镜模拟

```
R = 50.0 a = 5.0 r =  $\sqrt{a(2R - a)}$ ;
(*R是透镜折射球面的半径,a是透镜的厚度,r是透镜的顶点到光轴的距离,改变这些参数可以改变焦距*)
n1 = n3 = 1; n2 = 1.52; (*空气折射率和透镜折射率*) light = {};  $\theta = 0^\circ$ ; (* $\theta$ 为入射光的角度,我们可以更改其数值*)
Do[
  p1 = {- .50 R, y0}; k = n1 {Cos[ $\theta$ ], -Sin[ $\theta$ ]} (*P1为入射光,p4为出射光*)
  s = FindRoot[{k[[1]] (y - p1[[2]]) = k[[2]] (x - p1[[1]]),
     $R^2 - (y^2 + (x - R + a)^2) = 0$ }, {{x, -a}, {y, y0}}];
  p2 = {x, y} /. s; (*求出入射光在透镜第一个球面的入射点*)

  f =  $R^2 - (y^2 + (x - R + a)^2)$ ;  $\Omega = D[f, \{x, y\}]$  /. Thread[{x, y} -> p2];  $\Omega = \Omega / \text{Norm}[\Omega]$ ;  $G1 = k \cdot \Omega$ ;  $G2 = \sqrt{n2^2 - n1^2 + G1^2}$ ;
  k = k + (G2 - G1)  $\Omega$ ; s = FindRoot[{k[[1]] (y - p2[[2]]) = k[[2]] (x - p2[[1]]),  $y^2 + (x + R - a)^2 - R^2 = 0$ }, {{x, a}, {y, y0}}];
  p3 = {x, y} /. s; (*求出光在透镜第二个球面的出射点*)

  f =  $y^2 + (x + R - a)^2 - R^2$ ;  $\Omega = D[f, \{x, y\}]$  /. Thread[{x, y} -> p3];  $\Omega = \Omega / \text{Norm}[\Omega]$ ;  $G1 = k \cdot \Omega$ ;  $G2 = \sqrt{n3^2 - n2^2 + G1^2}$ ;
  k = k + (G2 - G1)  $\Omega$ ; p4 = {x,  $\frac{k[[2]]}{k[[1]]} (x - p3[[1]]) + p3[[2]]}$  /. x -> 2 R;

  AppendTo[light, Graphics[Line[{p1, p2, p3, p4}]]],
  {y0, -0.1 r, 0.1 r, 0.05 r}]
 $\alpha = \text{ArcSin}[r/R]$ ; Show[light,
  Epilog -> {Thick, Circle[{R - a, 0}, R, { $\pi - \alpha$ ,  $\pi + \alpha$ ]},
    Circle[{R + a, 0}, R, {- $\alpha$ ,  $\alpha$ ]},
  PlotRange -> {{-0.5 R, 1.5 R}, {-r, r}},
  AxesLabel -> {"x", "y"}]
```

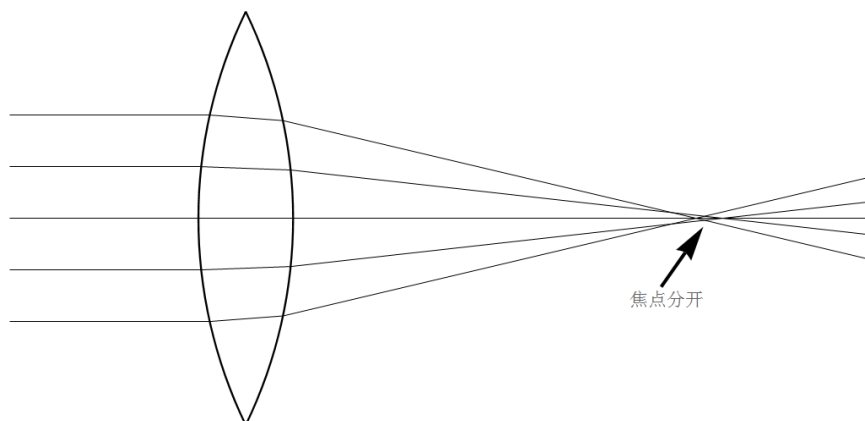


图 7 非旁轴的平行光成像

代码说明:改变 p1 中的 y0 数值, 即在前面乘以数值, 可以改变平行光的旁轴条件, 也就是可以使光离光轴近点或远一点。改变角度, 可以改变平行光的角度。

2.2.3 点光源成像

```
R = 200.; a = 5.; yb =  $\sqrt{a * (2R - a)}$ ; n1 = n3 = 1; n2 = 3;
light = {};  $\theta m = 5 \text{ Pi} / 180.0$ ; y0 = yb / 15;
Do[p1 = {-0.5 R, 2 y0}; k1 = {Cos[ $\theta 0$ ], -Sin[ $\theta 0$ ]};
equ1 = {y = p1[[2]] + k1[[2]] / k1[[1]] * (z - p1[[1]]), y^2 + (z - R + a)^2 == R^2}; s = Solve[equ1, {z, y}]; m = z /. s;
s = Select[s, (z /. #) == Min[m] &]; p2 = {z, y} /. s[[1]];
k = (n1 * k1[[2]] * (p2[[2]] * k1[[2]] + (p2[[1]] - R + a) * k1[[1]]) + (n2 - n1) * p2[[2]]) /
(n1 * k1[[1]] * (p2[[2]] * k1[[2]] + (p2[[1]] - R + a) * k1[[1]]) + (n2 - n1) * (p2[[1]] - R + a));
kz = 1 / Sqrt[1 + k^2]; ky = k * kz;
k2 = {kz, ky};
equ2 = {y = p2[[2]] + k2[[2]] / k2[[1]] * (z - p2[[1]]), y^2 + (z + R - a)^2 == R^2};
s = Solve[equ2, {z, y}];
m = z /. s; s = Select[s, (z /. #) == Max[m] &]; p3 = {z, y} /. s[[1]];
k = (n2 * k2[[2]] * (p3[[2]] * k2[[2]] + (p3[[1]] + R - a) * k2[[1]]) + (n3 - n2) * p3[[2]]) /
(n2 * k2[[1]] * (p3[[2]] * k2[[2]] + (p3[[1]] + R - a) * k2[[1]]) + (n3 - n2) * (p3[[1]] + R - a));
y = p3[[2]] + k (z - p3[[1]]);
p4 = {z, y} /. z -> R / 2;
g = Show[Graphics[{Thickness[0.004], Line[{p1, p2, p3, p4}]}]; AppendTo[light, g]; Clear[y, z]; { $\theta 0$ , - $\theta m$ ,  $\theta m$ ,  $\theta m / 4$ }];
 $\theta = \text{ArcSin}[yb / R]$ ;
Show[light,
Epilog -> {Thick, Circle[{R - a, 0}, R, { $\pi - \theta$ ,  $\pi + \theta$ ]},
Circle[{R - a, 0}, R, {- $\theta$ ,  $\theta$ ]},
PlotRange -> {{-R, R}, {-yb, yb}}, Ticks -> None,
Axes -> True, AxesStyle -> Thick[0.003]}
```

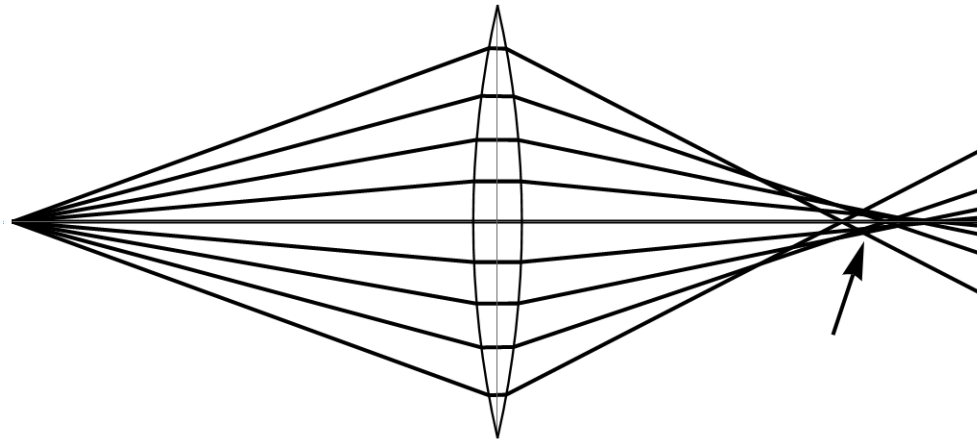


图 8 非旁轴下的点光源成像

通过模拟点光源与平行光, 在非旁轴条件下, 焦距会随着离光轴距离的增大而改变, 再根据牛顿公式可以知道放大率也随着离光轴距离的增大而改变, 这样就产生了畸变
下图为计算焦点与离光轴距离的结果

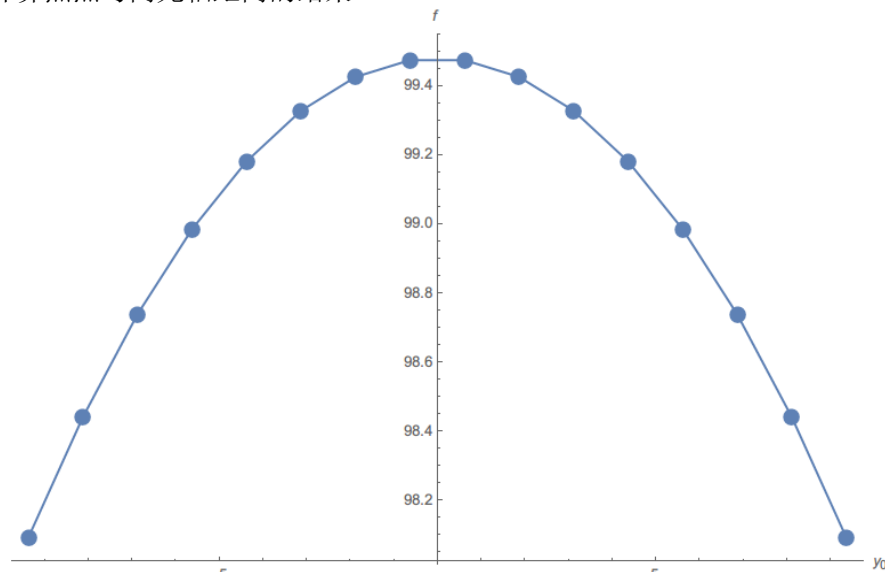


图 9 焦距随 y0 的变化曲线

2.2.4 模拟畸变

模拟畸变的图为 6 乘 8 的棋盘格。

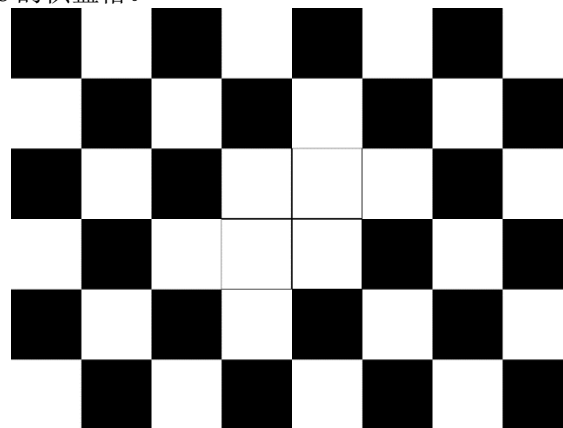


图 10 6 乘 8 的棋盘格

对它进行变换，变换原理为

考虑一个垂直于光学镜头轴线的平面 (P)，它的理想像面是 (P')。假设一个球面 S，它以镜头的像方主点为圆点，以像方焦距 f 为半径与 P' 平面相切于光轴通过 P' 平面的 O 点，如图 11 所示。

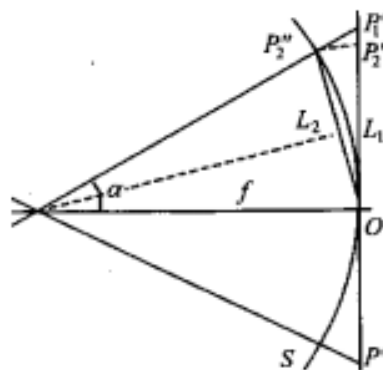


图 11 球面模型图像畸变原理

设平面 P 上的一点 P_1 ，如果不发生任何畸变，应该成像在成像面 P' 上的 P'_1 点处，假设现在由于光学系统或传感器的某些原因，成像发生了桶形畸变（对于枕形畸变可以类似分析），即成像不再落到像面 P' 上的 P'_1 点处，但是由于光学系统或传感器的畸变原因是很难精确描述的，所以将这种畸变做如下等效：现在假设光学系统不产生任何畸变，而是成像面发生了弯曲，即成像面不再是一个平面 P' ，而是形成了某种曲面，我们称这个曲面为畸变等效曲面。入射的光线成像在这个畸变等效曲面上，如果这个曲面产生畸变的结果与原来完全相同，那么这个畸变等效曲面就模拟了这种畸变产生的原因。为了方便分析，并结合畸变的特点，这里取畸变等效曲面为球面，如图 11 所示。图像的畸变相当

于平面 P' 上的各个点沿着各自的光线移到球面 S 上。向 P_1' 点入射的光线，与球面 S 相交于 P''_2 点，对应到平面 P' 上则为 P'_2 点（图中 $OP'_2=OP''_2$ ），这样，如图 12 所示，被摄物上一点 P_1 的理想像点 P_1' （与 O 点的距离为 L_1 ）畸变后就对应到 P'_2 点，距离 L_1 也就变成了 P'_2 与 O 点的距离 L_2 。¹

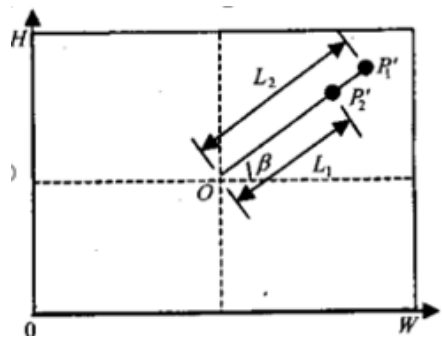
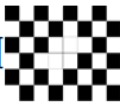


图 12 图像畸变示意图

简单地理解:畸变的图像，可以将它进行一种变化，将它变换成不畸变的图像，那么模拟，可以将不畸变的图像变换成畸变的图像，而这种变换，在上面的叙述中，我理解为是一种直角坐标系变换成球坐标系，故相应的代码:

```
d = 500; x0 = 512; y2 = 384; c = 1;
f[x_, y_] := {c (x - x0) d / ((x - x0)^2 + (y - y0)^2 + d^2)^0.5 + x0, c (y - y0) d / ((x - x0)^2 + (y - y0)^2 + d^2)^0.5 + y0}
ImageTransformation[, f, DataRange -> Full]
```

说明为 d 相当于畸变等效像面的半径， x_0 , y_0 是图像中心像素点的坐标。 C 为放大率。结果为

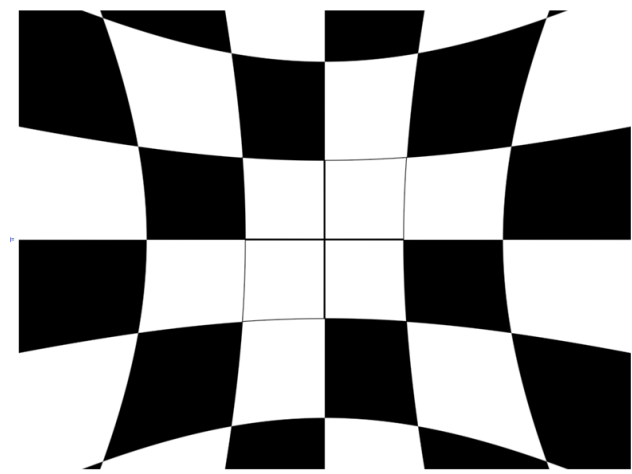
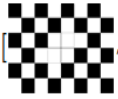


图 13 模拟枕形畸变

¹ 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正_韩广良

桶形畸变的代码为

```
f[x_, y_] := {(x - 512) 700 / (- (x - 512)^2 - (y - 384)^2 + 700^2)^0.5 + 512, (y - 384) 700 / (- (x - 512)^2 - (y - 384)^2 + 700^2)^0.5 + 384}
```

```
ImageTransformation[, f &@# &, DataRange -> Full]
```

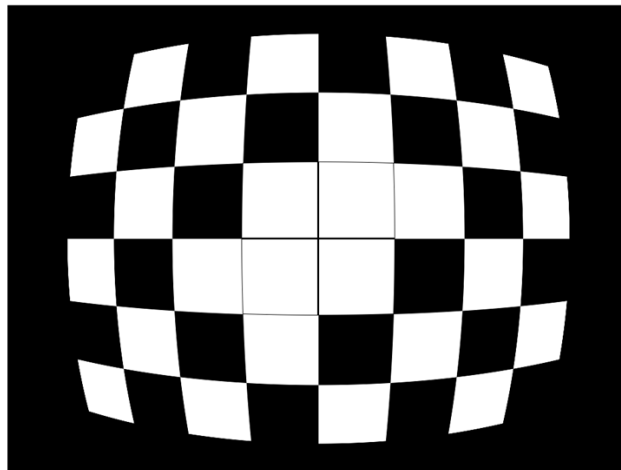


图 14 模拟桶形畸变

改变放大缩小率 C

```
f[x_, y_] := {2 (x - 512) 700 / ((x - 512)^2 + (y - 384)^2 + 700^2)^0.5 + 512, 2 (y - 384) 700 / ((x - 512)^2 + (y - 384)^2 + 700^2)^0.5 + 384}
```

```
ImageTransformation[, f &@# &, DataRange -> Full]
```

结果

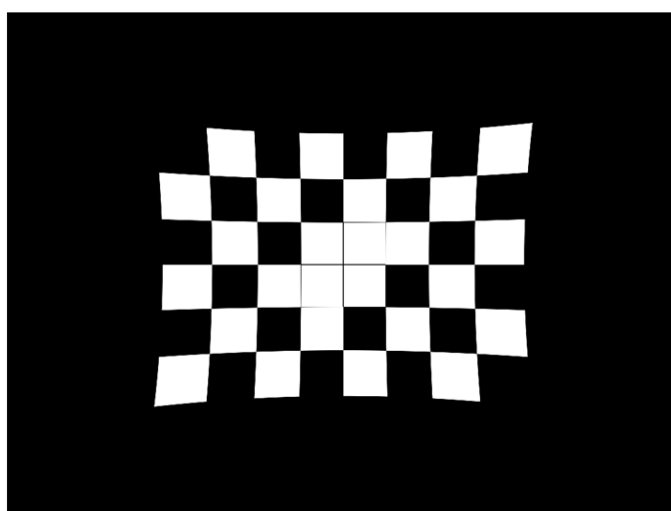


图 15 改变放大缩小率的枕形畸变

2.2.5 图像处理

处理方式读取拐点的像素坐标点，然后对比变换前后的坐标点，求出 q 来。

代码为

```
corners = ImageCorners[i, 10, 0.02, 6];
corners // MatrixForm
HighlightImage[i, corners]
```

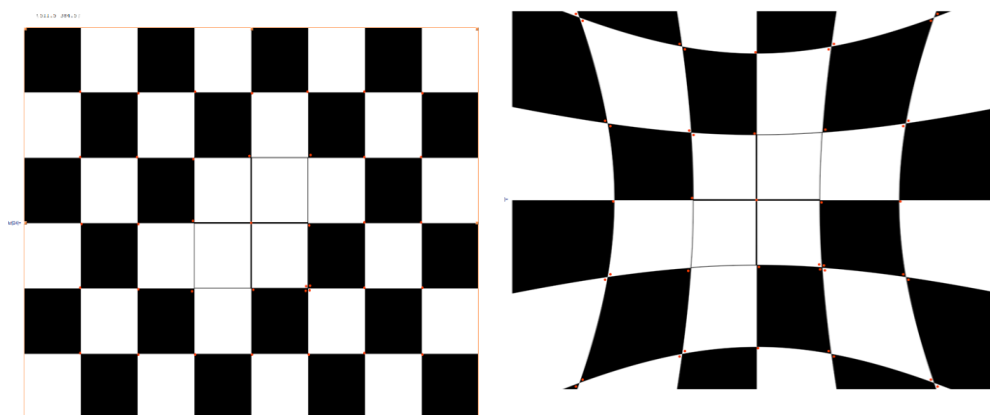


图 16 取图像拐点的 mathematica 示意图

这样，我们可以利用 q-d 的表格对应观测图像的相对畸变来衡量畸变的程度。

(取点为取四个角的点，然后算出各个畸变量，求平均。)

表 2 模拟相对畸变 q 与 d 对应数据

d	第一个格子的 q	第二个格子的 q	d	第一个格子的 q	第二个格子的 q
500	6.836%	45.117%	700	X	X
550	X	X	750	X	X
600	X	X	800	X	X
650	X	X	850	2.932%	10.549%

由于时间关系，表格中其他的数据并没有算出来。

2.2.6 实验数据处理

处理方法和上述类似，先用 mathematica 取拐点函数得到一些点的坐标，然后手动去放大读取合适的坐标，之所以这样做是因为图像质量不高，有许多拐点，暂时不能自动筛选掉这些点。读出坐标后，按照一个像素点是 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$ 还原像高，再根据牛顿公式计算出理想像高，这样就计算出相对畸变。

q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8 分别为上，左上，左，左下，下，右下，右，右上八个点，不同的棋盘格都取第一个大正方形的这 8 个点

结果如下表

表 3 相对畸变实验计算

放大倍数 $V=1/4$ ，棋盘格 6×8

焦距 mm	50	70	150
Q1	0.0125	-0.11877	0.05
Q2	-0.00938	-0.16265	0.049979
Q3	-1.15625	-0.09382	0.04373
Q4	-0.74321	-0.06877	0.049979
Q5	0.03125	-0.0625	0.043668
Q6	-0.02502	-0.05938	0.02498
Q7	0.375	-0.0625	0.01873
Q8	-0.01883	-0.10949	0.03748

比较不同焦距，可以发现，畸变在焦距 50mm 最小，成像最好。

焦距为 70mm，棋盘格 6×8

放大倍数	1/2	1/4	1/6
Q1	-0.01563	-0.11877	-0.02188
Q2	-0.01563	-0.16265	-0.03603
Q3	-0.83312	-0.09382	-0.05004
Q4	-0.01562	-0.06877	-0.06879
Q5	-0.01563	-0.0625	-0.0125
Q6	-0.04532	-0.05938	-0.03129
Q7	-0.03752	-0.0625	-0.03125
Q8	-0.03284	-0.10949	-0.03595

相对畸变较大是处于中间缩小倍数的。

焦距为 70mm，棋盘格 48×64

放大倍数	2	4
Q1	0.062479	-0.09688
Q2	0.046747	-0.08295
Q3	0.02498	-0.06875
Q4	0.02812	-0.09687
Q5	0.05	-0.09429
Q6	0.053079	-0.07982
Q7	0.055919	-0.06267
Q8	0.04062	-0.0907

随着放大倍数提高，从桶形畸变变化到枕形畸变

相对畸变在 x, y 方向数值大致相似，至少正负号是一致，在 $y=x$ 和 $y=-x$ 方向也数值上也大致相等，可以说明透镜畸变是成球对称分布.不过还是实验误差大，因为人眼观察时不精确，加之实验操作不规范，难以做到很好的球对称的图像。

3 验证阿贝成像原理

3.1 模拟图像

Mathematica 自带低通，高通，带通滤波函数，利用这些函数和动画函数可以直观地了解到各个频率滤波的情况，同样也可以给出各级光点滤波的理论图像。

我们利用的图像为 32T 一维光栅，原因是没有透射光栅的实际图像，如果利用 ccd 采集的图像会多一些频谱出现，所以用 32T 一维光栅近似认为是实际的透射光栅，我们会用 mathematica 做 ccd 采集 128T 一维光栅的傅立叶变换和 ccd 采集的实际一维透射光栅的傅立叶变换，对比 32T 一维光栅的傅立叶变换来具体说明原因。

代码如下：

```
Manipulate[LowpassFilter[i, c], {c, 0, 2}]
```

当 $c=0.03$ ，近似认为是只让零级光点通过，

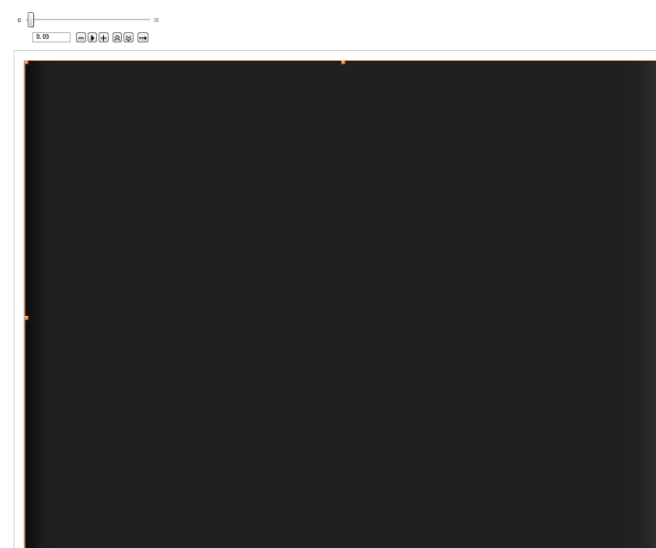


图 17 零级光点通过模拟图

零点光点相当于傅立叶变换中的常数项，所以图像应该是一个处处均匀的图像，实验图像是亮的原因是可以人为调高激光器的功率，是常数项变大，也就是变亮。

当 $c=0.1$ ，近似认为是只让零级光点和一级光点通过，

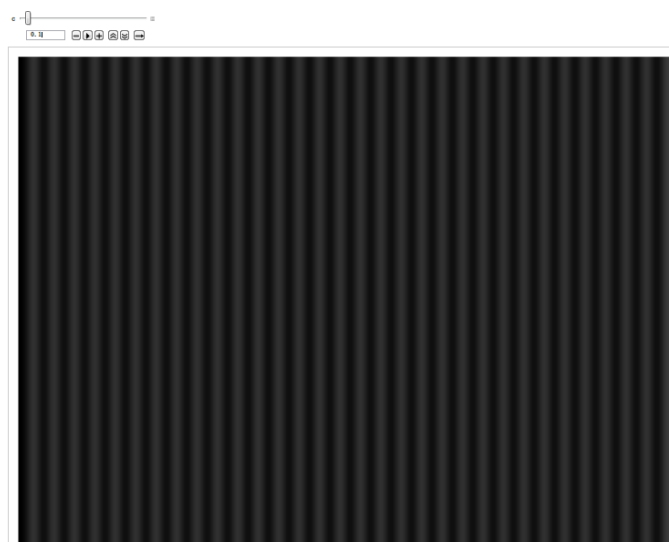


图 18 零级和一级光点通过模拟图

一级光点通过，即一个 \sin 函数存在，所以光强和 \sin 函数的平方是成线性关系(考虑到有常数项)，图像应该是一个亮纹和暗纹界限不明显的图像。模拟结果很好的反映这一点。实验图像也是尽量地接近这样图像，不过由于透射光栅间隔并不是很好相等，或者是实验操作出问题，不过从透射光栅的傅立叶图像可以看出不是一个一个的亮点，而是在一条亮的直线上有几个极大值的点，所以透射光栅图像并不是很好

当 $c=0.3$ 时，近似认为让零级光点和一级光点和二级光点通过

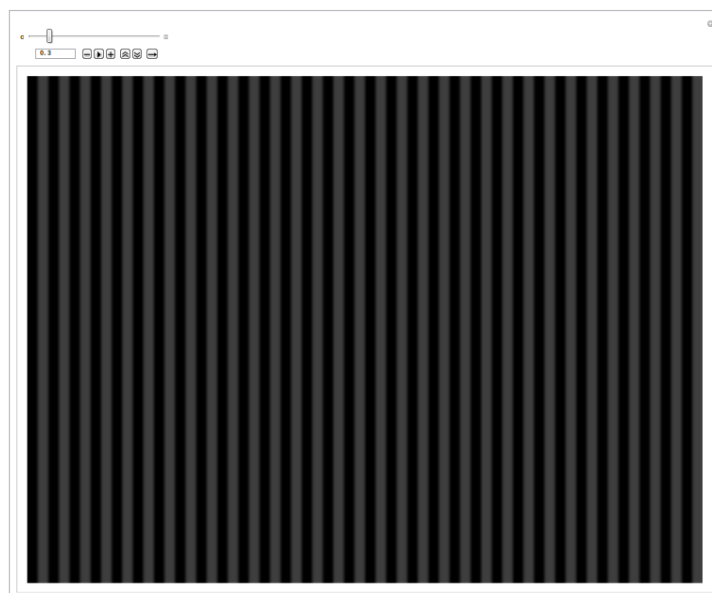


图 19 零级和一二级光点通过模拟图

二级光点通过，说明有 2 倍频率的 \sin 函数通过，不过由于前面的系数较小，所以人眼可能看不到暗纹中的一些极大值(亮纹)的存在，不过可以发现界限明显了，这是由于存在 2 倍的 \sin 函数使得总函数更加接近方波的形状，即界限更

加明显了。

3.2 实验图像

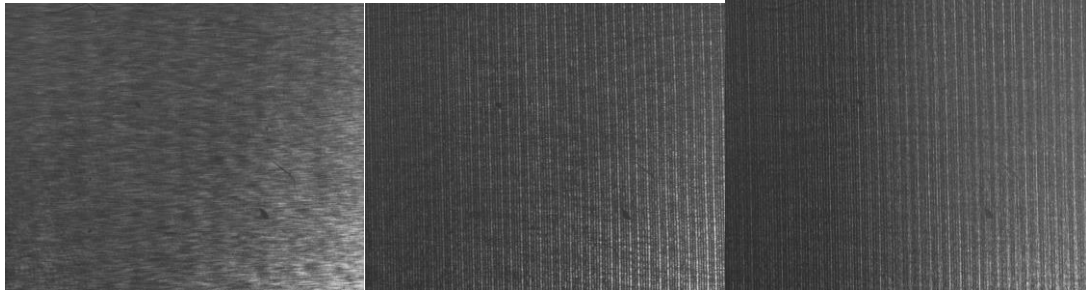


图 20 透射光栅 0 级, 1 级, 2 级图像

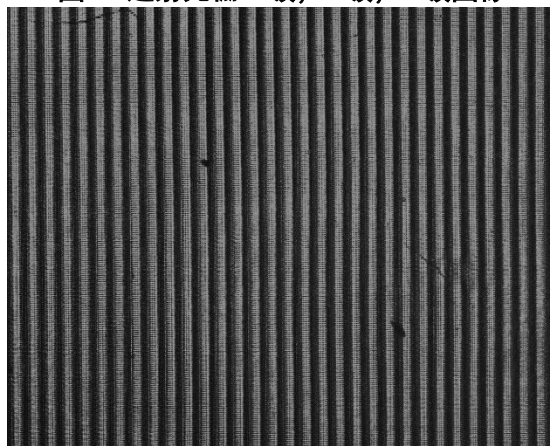


图 21 128T 条纹未滤波原图像

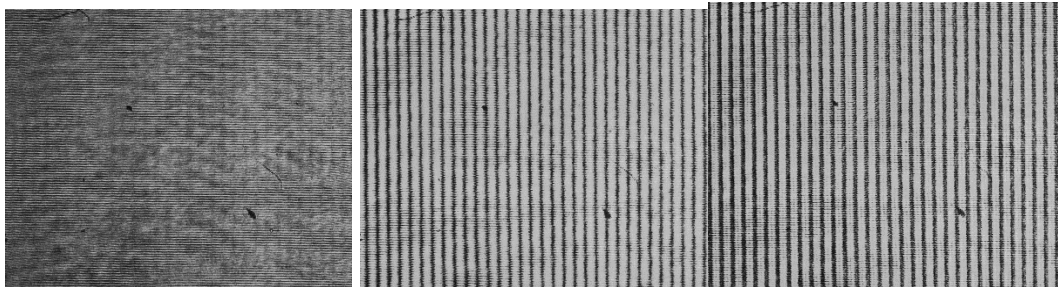


图 22 128T 条纹 0 级, 1 级, 2 级图像

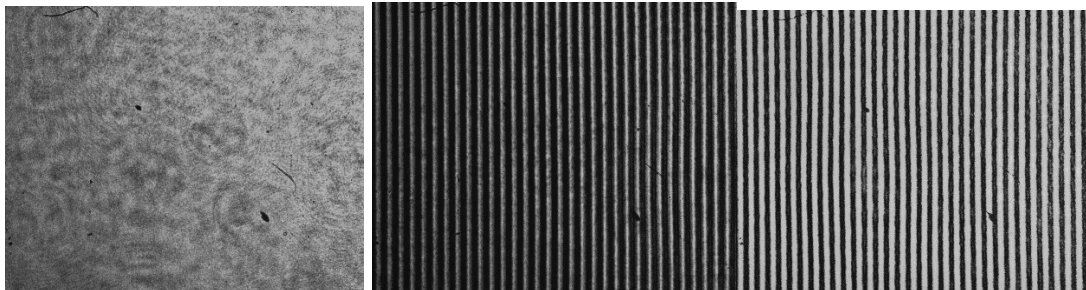


图 23 128T 条纹利用可变光阑 0 级, 1 级, 2 级图像

对比利用刀缝过滤光点和利用可变光阑过滤光点, 图 22 的明显有暗的横条纹存在, 刀缝过滤只能过滤到 x 轴的光点, 不能过滤 y 轴的光点, 所以会存在暗的横条纹。而可变光阑可以过滤 y 轴的光点, 所以图像不存在暗的横条纹

对比利用刀缝过滤光点和透射光栅的图像，也就是说明了之所以会存在 y 轴的光点，是因为空间调制器成像是按照像素成像的，简单地理解就是 # 中间的点发光，许多的 # 就可以成像，但是这样的成像并不是原来的连续的图像，而是分立的点阵，所以就会带来 y 轴的光点

3.3 Mathematica 模拟傅立叶变换

用 mathematica 求出透射光栅的傅立叶变换以及实际采集的 128T 一维光栅和理论图像的 32T 一维光栅的傅立叶变换(其中 32T 一维光栅由于是连续的图像，所以生成的傅立叶变换是在 x 轴上面的一系列的亮点，亮点比较小，所以截图主要是截相应的区域)

代码

```
picdata = i // ImageData;  
picFourier = Fourier[picdata * PadRight[{{}}, Most[picdata // Dimensions], {{1, -1}, {-1, 1}}]] // Abs // Image
```

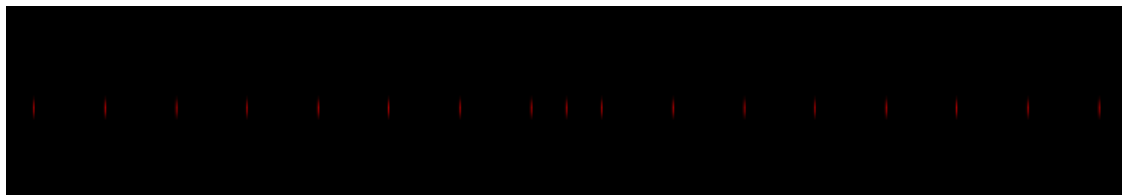


图 24 空间调制器使用的 32T 条纹的傅立叶变换图像

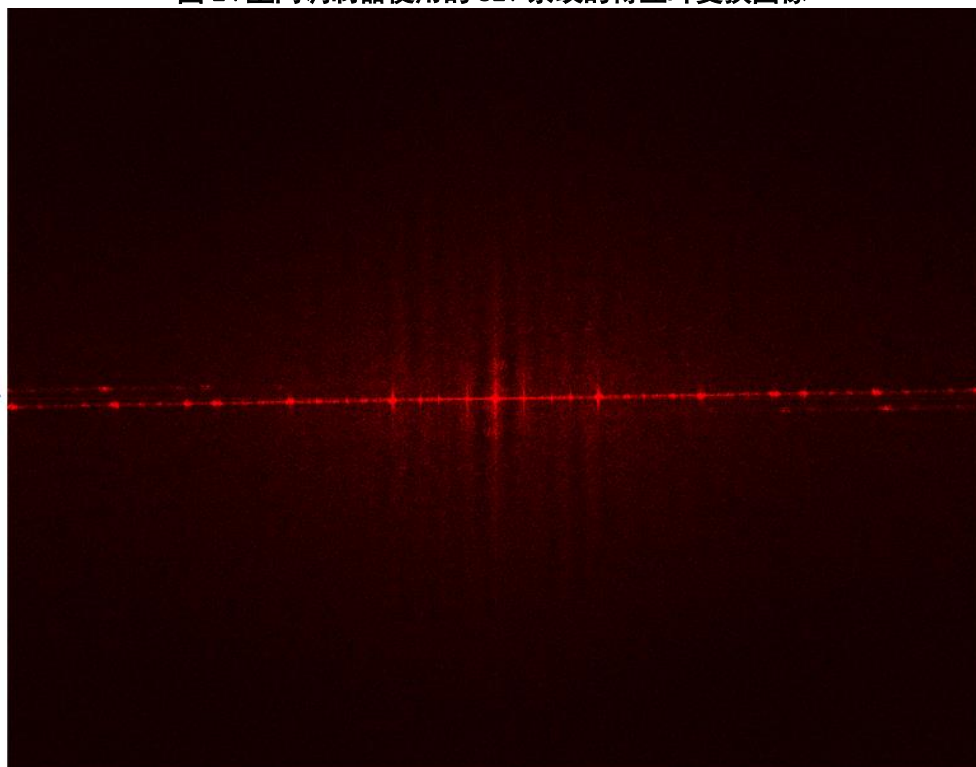


图 25 透射光栅傅立叶图像

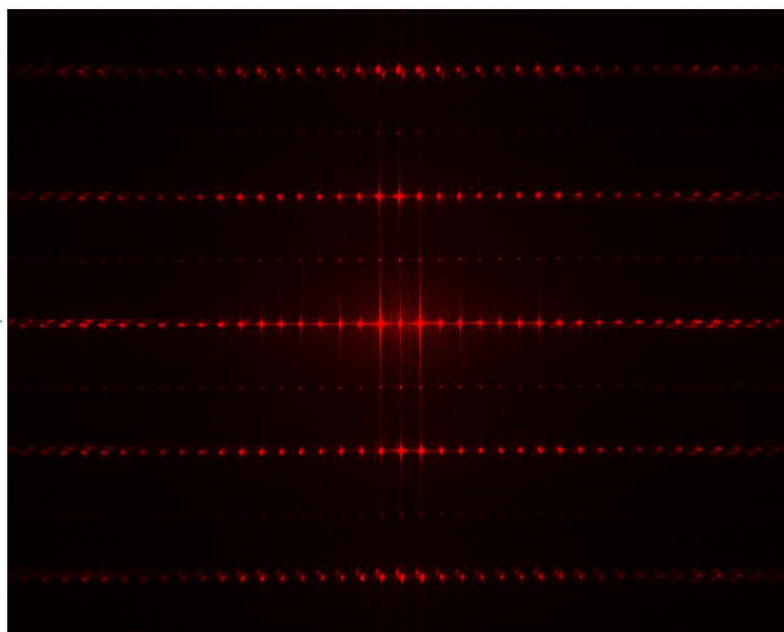


图 26 128T 实验观测的图像傅立叶变换

对比透射光栅和 128T 实验观测的图像的傅立叶，可以发现空间调制器会使傅立叶图像存在 y 轴的光点

3.4 高通滤波和低通滤波

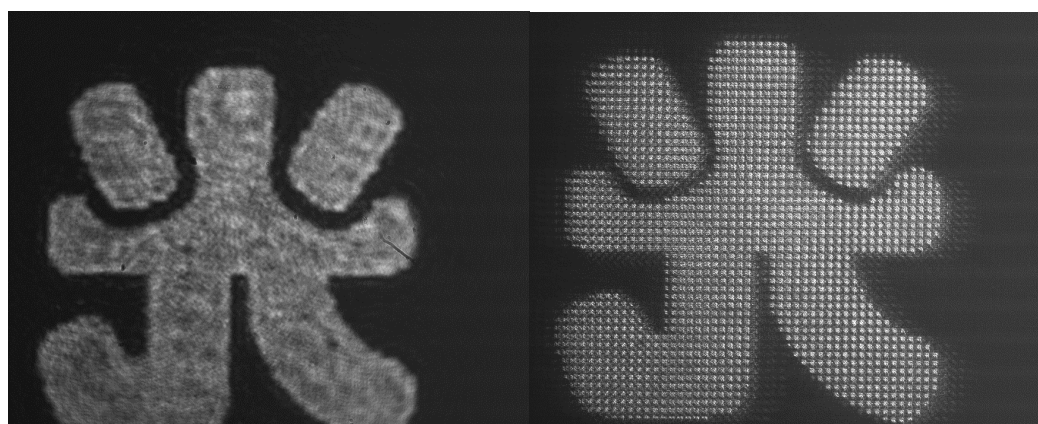


图 27 低通滤波和高通滤波

模拟结果



图 28 Mathematica 低通滤波高通滤波

3.5 方向滤波

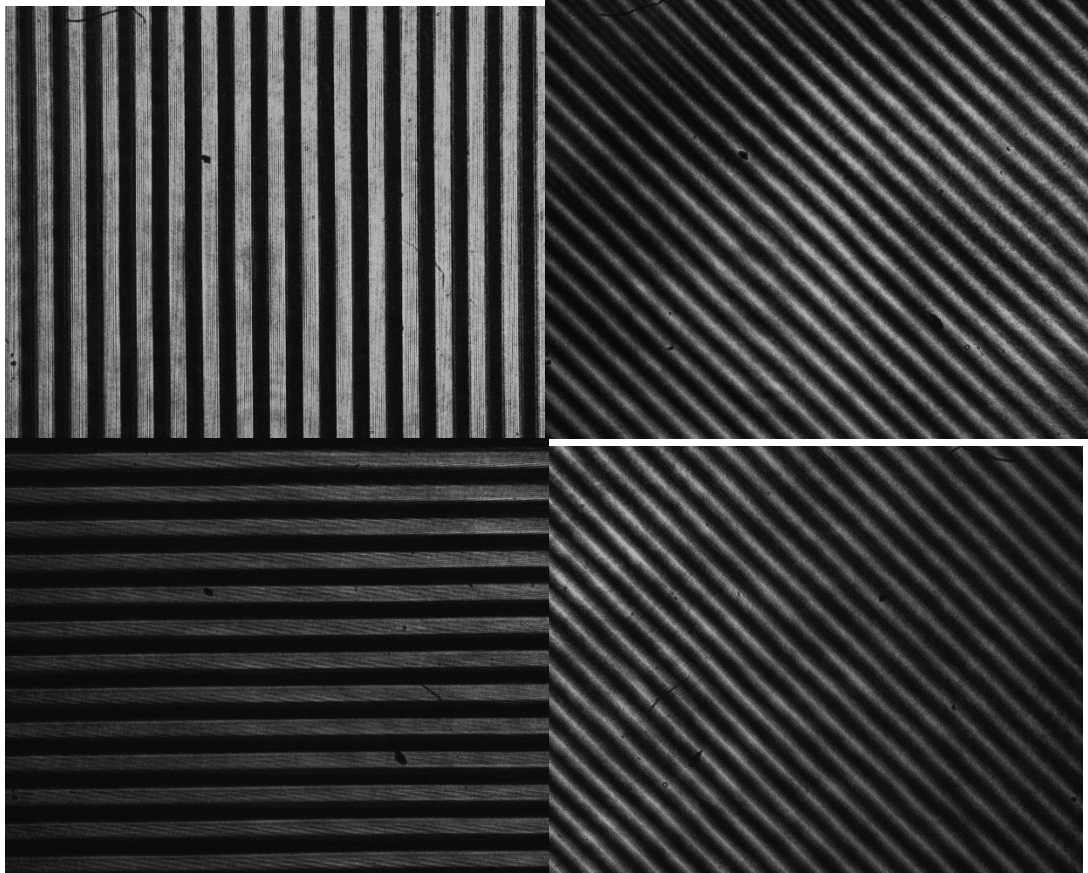


图 29 方向分别为 0, 45, 90, 135 度滤波图像

通过数像素的方法，我们得到了两条条纹之间的距离，横条纹之间有 405.6um，竖条纹有 416um，斜条纹有 290.50um，它们之间的比值都大致接近 $1/\sqrt{2} = 0.707$ ，分别为 0.716 和 0.698

会出现这种情况是因为斜条纹的 $\pm n$ 级的空间频率是横或竖条纹 $\pm n$ 级的空间频率的 $\sqrt{2}$ 倍（角度较小的情况下，可近似得到衍射角为 $\sqrt{2}$ 倍）

4 参考文献

1. 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正_韩广良