

## VR 实验设置

为了在 VR 中看到三维的虚拟物体，我们先假设空间中存在该物体，然后在左右屏幕上分别显示左右视角下“拍摄”的该物体的影像，通过左右眼融合形成立体视觉。立体视觉中的深度感来源于特征点在左右影像的视差。理论上，特征点从空间左边系转换到像点坐标系如图 1 所示。物体特征点在左右相片的像点坐标 $(x_L, y)$ ， $(x_R, y)$ 计算公式为：

$$\frac{x_L}{X + \frac{I}{2}} = \frac{x_R}{X - \frac{I}{2}} = \frac{V}{D}$$

$$\frac{y}{Y} = \frac{V}{D}$$

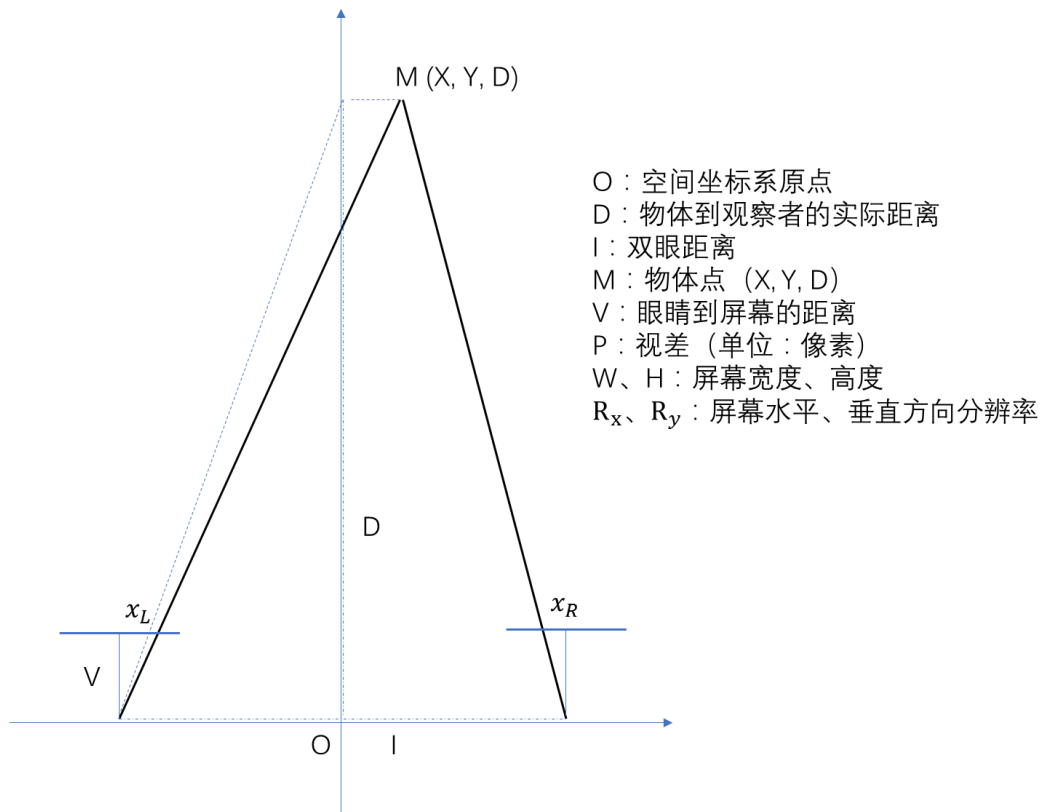


图 1 空间坐标转换为像点坐标

根据该转换公式，可以先设计好三维虚拟场景中物体的尺寸和位置，然后转换成左右屏幕的影像。为了研究 VR 设备中，JND 与 luminance adaptation、spatial (contrast) masking、retina eccentricity、visual depth 之间的关系，我们将实验分为两组：luminance adaptation、contrast masking。

### (1) Contrast masking

Contrast masking 实验当中，jnd 和 background luminance ( $bg$ )、contrast ( $eh$ )、retina eccentricity ( $e$ )、visual depth ( $d$ ) 相关，由于已经有了 SJND，实验中设置  $bg$  不变。实验场景设置如图 2 所示。十字丝和背景显示在一个平面上，该平面和观察者的距离  $D$  固定为 1，平面的灰度值  $bg$  固定为 128；噪声随机出现在圆的边缘上，根据  $e$  调整圆的半

径, 圆和背景的深度差  $d$ 。由于  $\lim_{x \rightarrow 0} \tan^{-1} x = x$ , 而且人眼的舒适区视差范围为  $(-1^\circ, 1^\circ)$ ,

$$\left| \frac{l}{D-d} - \frac{l}{D} \right| \leq \frac{\pi}{180}$$

眼距  $l=6.3\text{cm}$ , 当十字丝到人眼的距离为  $1\text{m}$  时,  $-38.3\text{cm} \leq d \leq 21.7\text{cm}$ 。

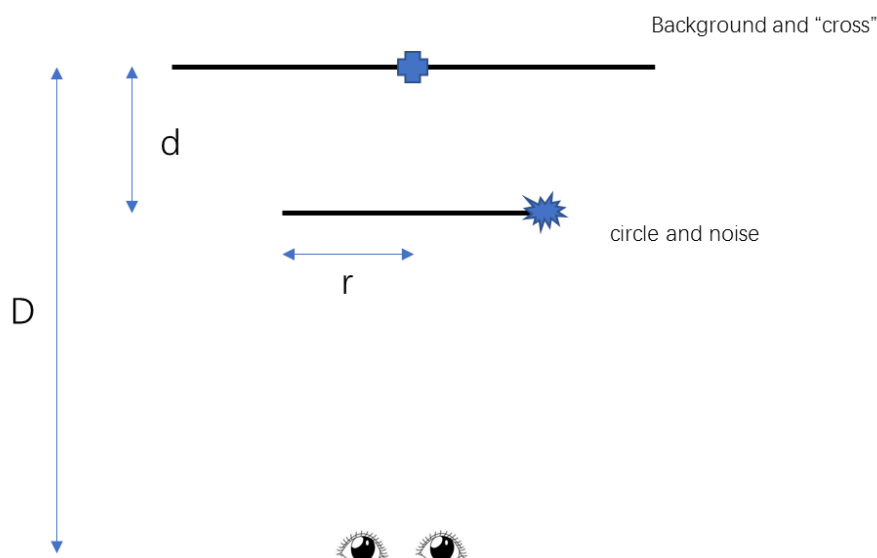


图 2 Contrast masking 实验物理空间示意图

实验时  $e$  取(10, 20, 30, 40),  $eh$  取(0, 20, 40, 60),  $d$  取(0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2), 共  $4 \times 4 \times 5 = 80$  次观察实验。

## (2) Luminance adaptation

Luminance adaptation 实验当中 jnd 和 background luminance (bg)、retina eccentricity (e)、visual depth (d)相关。实验时去掉用于形成 contrast 的圆, 但是噪声平面必须要有一定的纹理才能双眼融合形成深度感, 因此在噪声平面加入一个固定大小的矩形当做纹理, 噪声分布在该矩形内部。VR 眼睛的示意图如图 3。其他参数的设置和 Contrast 实验一致。实验时  $e$  取(10, 20, 30, 40),  $bg$  取(20, 90, 170, 240),  $d$  取(0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2), 共  $4 \times 4 \times 5 = 80$  次观察实验

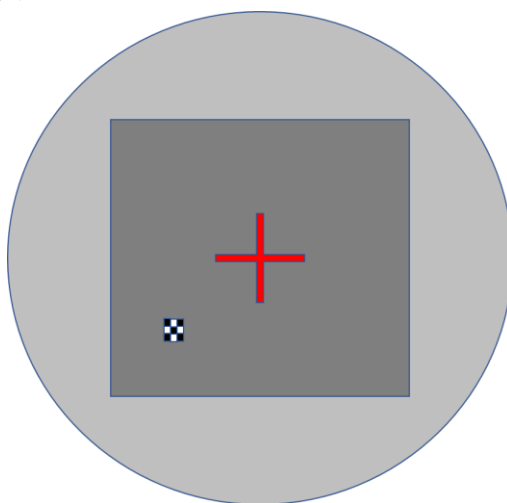


图 3. Bg 实验 VR 场景示意图

# 实验结果

前期共 4 个人参加实验，每个人分别做一组 bg 实验和一组 eh 实验，共观察 160 次，将 4 个人的观测结果取均值可以得到表 1、2 中的结果。

表 1 bg 实验结果

| lum | fov | dep | jnd  | lum | fov | dep | jnd  | lum | fov | dep | jnd  | lum | fov | dep | jnd  |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| 20  | 10  | 0.8 | 7.5  | 90  | 10  | 0.8 | 9    | 160 | 10  | 0.8 | 10.8 | 230 | 10  | 0.8 | 13.5 |
| 20  | 10  | 0.9 | 6.25 | 90  | 10  | 0.9 | 10.3 | 160 | 10  | 0.9 | 14   | 230 | 10  | 0.9 | 16.5 |
| 20  | 10  | 1   | 9.75 | 90  | 10  | 1   | 10   | 160 | 10  | 1   | 14.3 | 230 | 10  | 1   | 22.8 |
| 20  | 10  | 1.1 | 7    | 90  | 10  | 1.1 | 8.75 | 160 | 10  | 1.1 | 15   | 230 | 10  | 1.1 | 18   |
| 20  | 10  | 1.2 | 10.3 | 90  | 10  | 1.2 | 11   | 160 | 10  | 1.2 | 14.3 | 230 | 10  | 1.2 | 21.3 |
| 20  | 20  | 0.8 | 11.3 | 90  | 20  | 0.8 | 9    | 160 | 20  | 0.8 | 13.5 | 230 | 20  | 0.8 | 18.3 |
| 20  | 20  | 0.9 | 9    | 90  | 20  | 0.9 | 6.75 | 160 | 20  | 0.9 | 14   | 230 | 20  | 0.9 | 20.8 |
| 20  | 20  | 1   | 10.3 | 90  | 20  | 1   | 11.8 | 160 | 20  | 1   | 14   | 230 | 20  | 1   | 21.5 |
| 20  | 20  | 1.1 | 11   | 90  | 20  | 1.1 | 11.5 | 160 | 20  | 1.1 | 14.5 | 230 | 20  | 1.1 | 27.8 |
| 20  | 20  | 1.2 | 14   | 90  | 20  | 1.2 | 9.75 | 160 | 20  | 1.2 | 16.8 | 230 | 20  | 1.2 | 22.5 |
| 20  | 30  | 0.8 | 12.5 | 90  | 30  | 0.8 | 16.3 | 160 | 30  | 0.8 | 17.3 | 230 | 30  | 0.8 | 28.3 |
| 20  | 30  | 0.9 | 13   | 90  | 30  | 0.9 | 12.5 | 160 | 30  | 0.9 | 15.8 | 230 | 30  | 0.9 | 20.3 |
| 20  | 30  | 1   | 14.8 | 90  | 30  | 1   | 16.8 | 160 | 30  | 1   | 18.8 | 230 | 30  | 1   | 25.5 |
| 20  | 30  | 1.1 | 14   | 90  | 30  | 1.1 | 14.3 | 160 | 30  | 1.1 | 20.3 | 230 | 30  | 1.1 | 23   |
| 20  | 30  | 1.2 | 23.5 | 90  | 30  | 1.2 | 17   | 160 | 30  | 1.2 | 17.3 | 230 | 30  | 1.2 | 26   |
| 20  | 40  | 0.8 | 18.8 | 90  | 40  | 0.8 | 13.8 | 160 | 40  | 0.8 | 18.8 | 230 | 40  | 0.8 | 20.5 |
| 20  | 40  | 0.9 | 17   | 90  | 40  | 0.9 | 14.3 | 160 | 40  | 0.9 | 19.8 | 230 | 40  | 0.9 | 24.3 |
| 20  | 40  | 1   | 19.5 | 90  | 40  | 1   | 13   | 160 | 40  | 1   | 18.3 | 230 | 40  | 1   | 24.5 |
| 20  | 40  | 1.1 | 26   | 90  | 40  | 1.1 | 17.8 | 160 | 40  | 1.1 | 21.5 | 230 | 40  | 1.1 | 26   |
| 20  | 40  | 1.2 | 21.8 | 90  | 40  | 1.2 | 16   | 160 | 40  | 1.2 | 20   | 230 | 40  | 1.2 | 35.3 |

表 2 eh 实验结果

| eh | fov | dep | jnd  | eh | fov | dep | jnd  | eh | fov | dep | jnd  | eh | fov | dep | jnd  |
|----|-----|-----|------|----|-----|-----|------|----|-----|-----|------|----|-----|-----|------|
| 0  | 10  | 0.8 | 11.5 | 20 | 10  | 0.8 | 10   | 40 | 10  | 0.8 | 13.5 | 60 | 10  | 0.8 | 12.5 |
| 0  | 10  | 0.9 | 12.5 | 20 | 10  | 0.9 | 12.3 | 40 | 10  | 0.9 | 13.5 | 60 | 10  | 0.9 | 13.8 |
| 0  | 10  | 1   | 11.8 | 20 | 10  | 1   | 11.8 | 40 | 10  | 1   | 11.8 | 60 | 10  | 1   | 13.3 |
| 0  | 10  | 1.1 | 13.8 | 20 | 10  | 1.1 | 14.3 | 40 | 10  | 1.1 | 17.3 | 60 | 10  | 1.1 | 15   |
| 0  | 10  | 1.2 | 15.5 | 20 | 10  | 1.2 | 19   | 40 | 10  | 1.2 | 18.5 | 60 | 10  | 1.2 | 23.8 |
| 0  | 20  | 0.8 | 9.5  | 20 | 20  | 0.8 | 8.5  | 40 | 20  | 0.8 | 9.5  | 60 | 20  | 0.8 | 9.25 |
| 0  | 20  | 0.9 | 11.5 | 20 | 20  | 0.9 | 10.5 | 40 | 20  | 0.9 | 10.5 | 60 | 20  | 0.9 | 11.5 |
| 0  | 20  | 1   | 12   | 20 | 20  | 1   | 13.3 | 40 | 20  | 1   | 12.8 | 60 | 20  | 1   | 12.3 |
| 0  | 20  | 1.1 | 13.5 | 20 | 20  | 1.1 | 11.5 | 40 | 20  | 1.1 | 13   | 60 | 20  | 1.1 | 15.3 |
| 0  | 20  | 1.2 | 13.3 | 20 | 20  | 1.2 | 13.3 | 40 | 20  | 1.2 | 14.8 | 60 | 20  | 1.2 | 15.5 |
| 0  | 30  | 0.8 | 9.5  | 20 | 30  | 0.8 | 8    | 40 | 30  | 0.8 | 10.3 | 60 | 30  | 0.8 | 9.25 |
| 0  | 30  | 0.9 | 11   | 20 | 30  | 0.9 | 9    | 40 | 30  | 0.9 | 8.75 | 60 | 30  | 0.9 | 9    |
| 0  | 30  | 1   | 11.8 | 20 | 30  | 1   | 10.5 | 40 | 30  | 1   | 10.8 | 60 | 30  | 1   | 12.8 |
| 0  | 30  | 1.1 | 15   | 20 | 30  | 1.1 | 12   | 40 | 30  | 1.1 | 14.8 | 60 | 30  | 1.1 | 12.8 |
| 0  | 30  | 1.2 | 15.3 | 20 | 30  | 1.2 | 13.8 | 40 | 30  | 1.2 | 15.5 | 60 | 30  | 1.2 | 15.3 |
| 0  | 40  | 0.8 | 9.75 | 20 | 40  | 0.8 | 8.75 | 40 | 40  | 0.8 | 10.5 | 60 | 40  | 0.8 | 10   |
| 0  | 40  | 0.9 | 9.5  | 20 | 40  | 0.9 | 14.3 | 40 | 40  | 0.9 | 10.3 | 60 | 40  | 0.9 | 12.8 |
| 0  | 40  | 1   | 10.5 | 20 | 40  | 1   | 10.8 | 40 | 40  | 1   | 11.8 | 60 | 40  | 1   | 11.3 |
| 0  | 40  | 1.1 | 13.5 | 20 | 40  | 1.1 | 10.8 | 40 | 40  | 1.1 | 13.3 | 60 | 40  | 1.1 | 18.5 |
| 0  | 40  | 1.2 | 15.8 | 20 | 40  | 1.2 | 13.8 | 40 | 40  | 1.2 | 11   | 60 | 40  | 1.2 | 18.5 |

绘图进一步显示 JND 与不同变量之间的关系。由于每个实验中 JND 都至少与三个变量相关，这样的四维数据无法用三维曲面拟合。为了探索 VR 中 JND 与这些变量尤其是深度的关系，通过求平均的方式消除一个维度的变量，例如为了观察 bg 实验中 JND 与 e 和 d 两个变量之间的关系，我们把 fov、dep 相同，lum 不同的观测值的 JND 求平均，以达到消除 lum 纬度的目的。然后依次绘图。可以初步判断，VR 眼镜实验中，当注视点的深度值固定时，空间中的点与观察者距离越远，JND 值越大，但是不同被试在同一 Depth 的实验结果分布方差较大。在 bg 试验中，JND 与 bg、e 的关系基本符合 2D JND 实验中的规律：bg 在最暗和最亮的部分 JND 越大、e 越大 JND 越大；在 eh 实验中，JND 与 eh、e 的关系都不是特别明显，可能与初步实验流程不是很仔细，为了节约时间未严格采用“阶梯法”进行实验有关，后续进一步实验看是否有所改善。

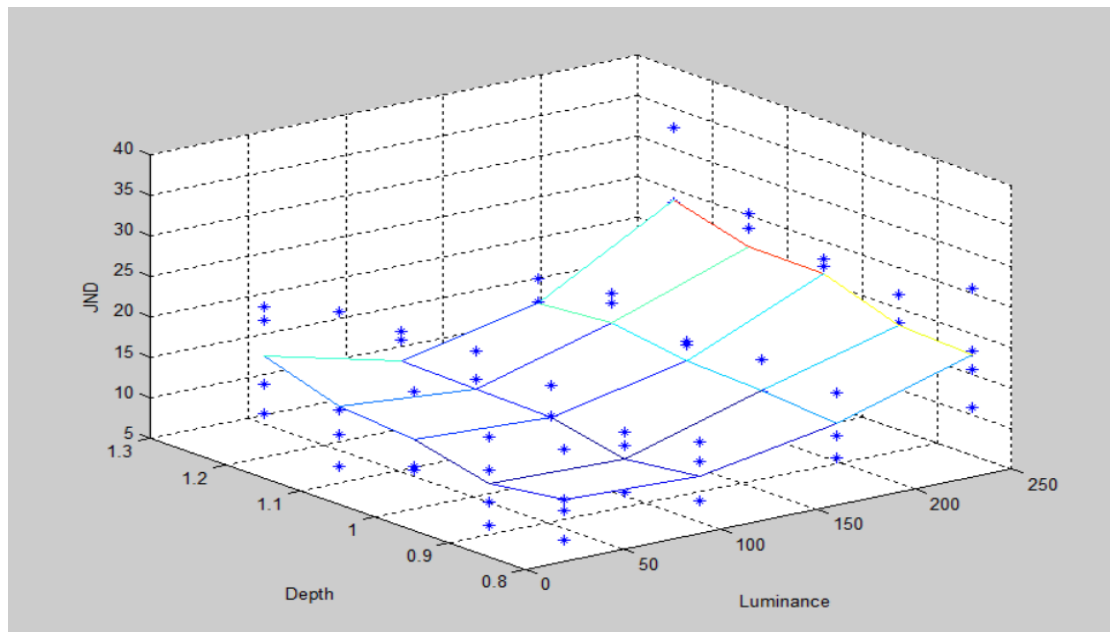


图 4 bg 实验中 JND 与 bg、d 的关系

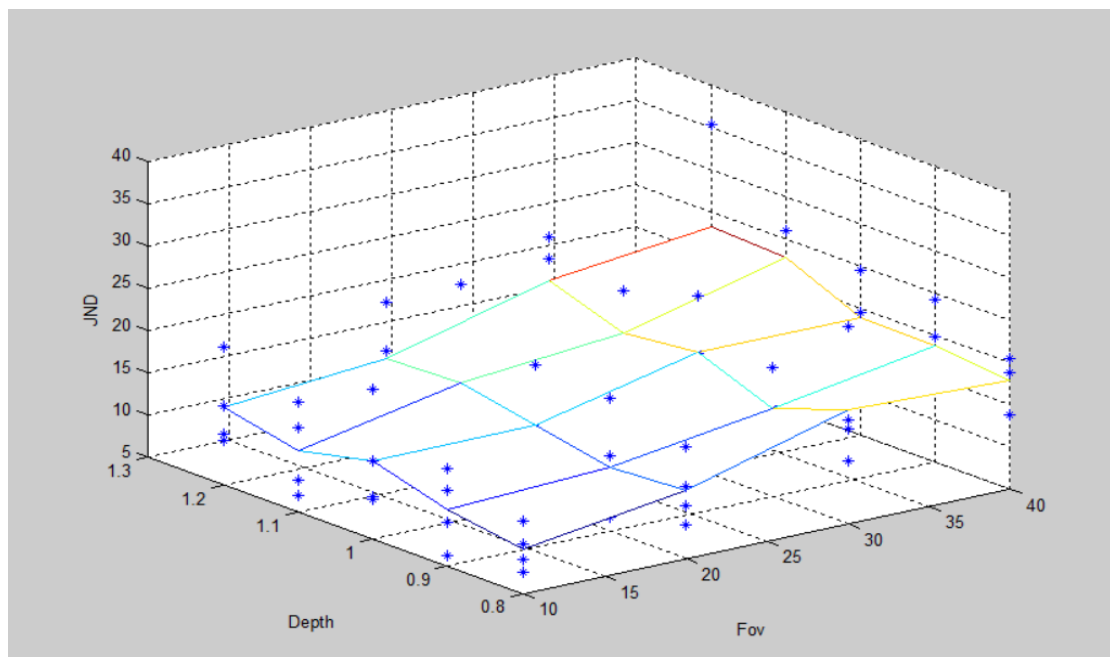


图 5 bg 实验中 JND 与 e、d 的关系

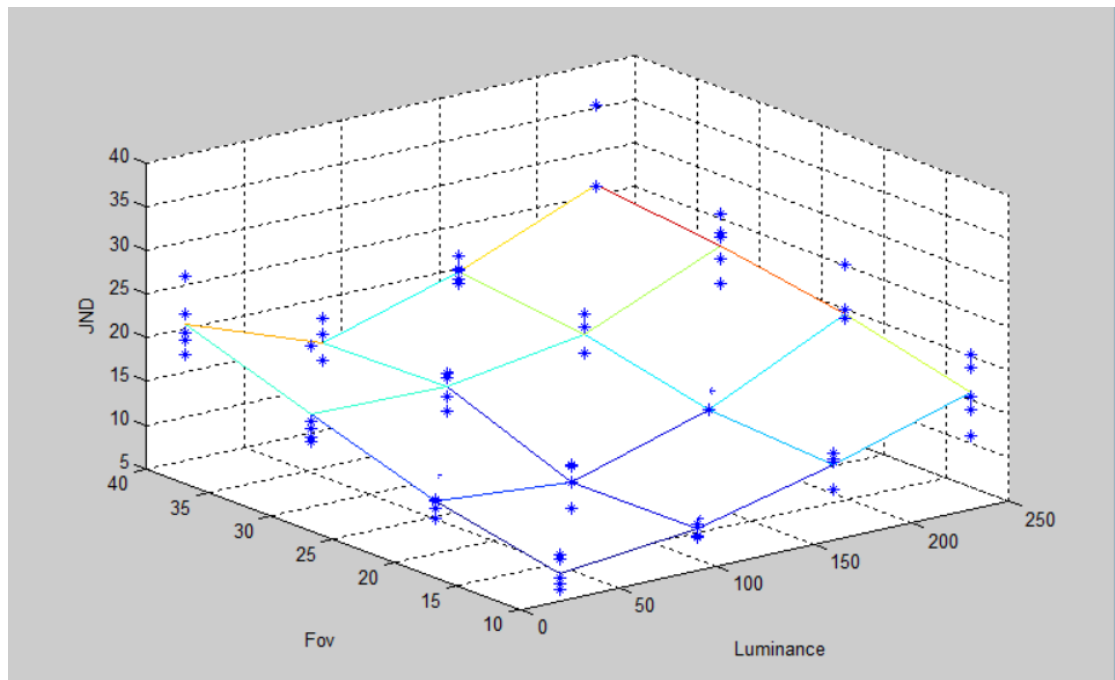


图 6 bg 实验中 JND 与 bg、e 之间的关系

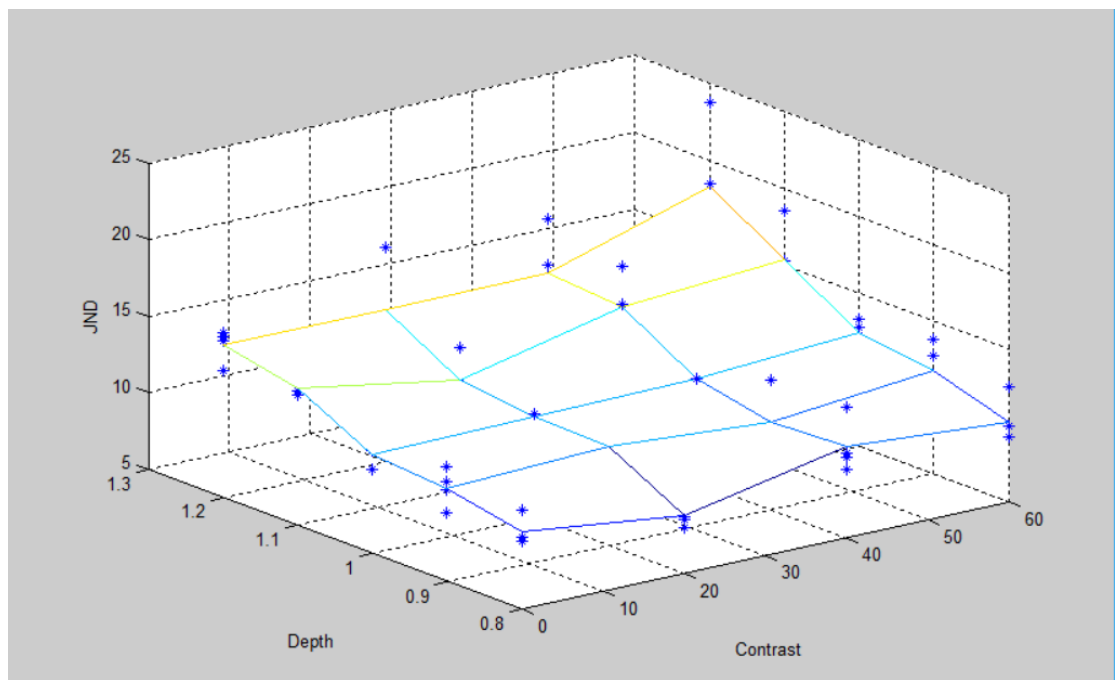


图 7 eh 实验中 JND 与 eh、d 之间的关系

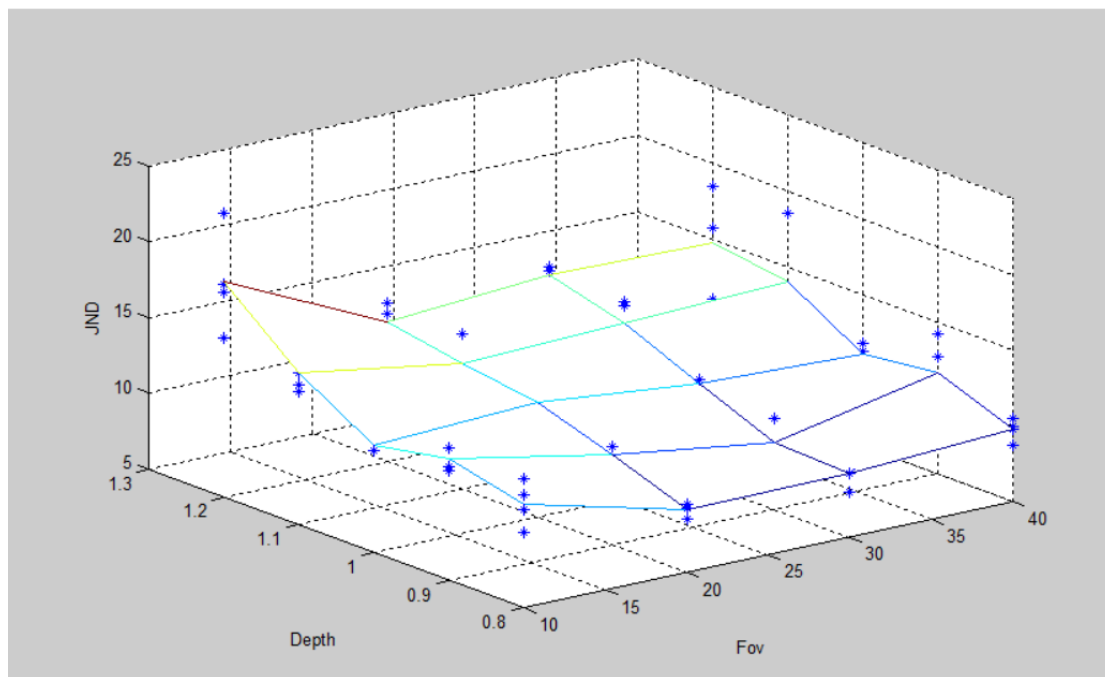


图 8 eh 实验中 JND 与 e、d 之间的关系

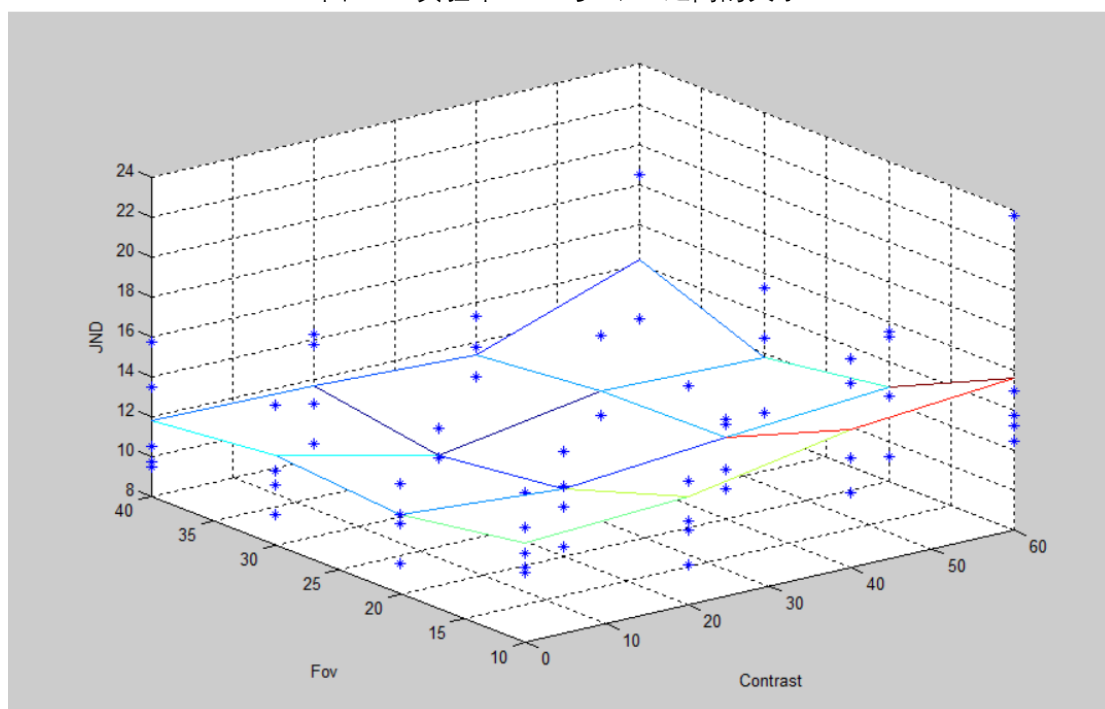


图 9 eh 实验中 JND 与 e、eh 的关系