

测量智能手机摄像头焦距的居家物理实验

黄 刚

武汉科技大学, 理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年8月29日; 录用日期: 2021年11月29日; 发布日期: 2021年12月6日

摘 要

疫情不能到校学习期间, 利用家里有的物品, 进行测量智能手机摄像头焦距的居家物理实验, 不但增强了物理实验趣味性, 加深学生对几何光学知识的学习, 还使居家实验成为疫情期间大学物理实验教学的一个新途径。

关键词

居家, 物理实验, 焦距, 智能手机

Home Physics Experiment for Measuring the Focal Length of Smartphone Camera

Gang Huang

School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Aug. 29th, 2021; accepted: Nov. 29th, 2021; published: Dec. 6th, 2021

Abstract

During the period when the epidemic situation cannot be studied in school, the home physics experiment of measuring the focal length of Smartphone camera by using some items at home not only enhances the interest of physics experiment and deepens students' learning of geometric optics knowledge, but also makes home experiment a new way of college physics experiment teaching during the epidemic situation.

Keywords

Home, Physical Experiment, Focal Length, Smartphone

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2020 年年初突如其来的新冠肺炎疫情，打乱了所有学校的春季教学安排，师生都不能到校开展教学活动。为了响应教育部“停课不停教、停课不停学”的号召，也得益于我国近年来 4G/5G 网络的高速建设和普及，各地学校都积极开展网上在线教学活动[1] [2]。可是理论课程能通过网上直播、钉钉以及腾讯会议等等软件在线开展，大学物理实验作为一门需要动手操作的实践课程，该如何进行呢？

有高校通过虚拟仿真实验软件来进行实验教学[3] [4]，可是学生没有实际动手的体验感，教学效果难以保证。我们大物实验教学团队经过分析研究后，认为将虚拟仿真实验和居家物理实验结合起来是一个很好的教学方案。几乎每个大学生都拥有智能手机，但他们可能很少人意识到自己其实拥有一个移动的小型物理实验室，可以用来进行力学、热学、光学、电磁学，甚至还可以进行医学等方面的实验[5]-[11]。所有智能手机都装配有一个甚至多个摄像头，摄像头可以说是手机上使用最多的传感器，可以用来拍照、录像、扫描二维码等。在本文中我们介绍如何在家里利用智能手机测量智能手机摄像头的焦距，加深对几何光学和透镜成像相关知识的学习。

2. 实验原理

图 1 所示为智能手机拍照成像的示意图，虚线框中为智能手机摄像头内部示意图，凸透镜为 L，摄像头的 CCD (或 CMOS) (CCD 与 CMOS 传感器是当前被普遍采用的两种影像感测组件，两者都是利用感光二极管进行光与电的转换，将影像转换为数字信息，主要差异是数字信号传送方式不同)传感器为 C，O 点为凸透镜中心，F 点为凸透镜右侧焦点，f 为焦距，焦距是相机的一个重要参数，表示凸透镜对光的会聚能力，焦距小拍照时视野较大，放大倍数小，焦距大时视野较窄，放大倍数大。智能手机摄像头的焦距由生产厂家设计确定，通常在手机说明书参数表中或者网络上可以查到。

对于薄凸透镜成像，透镜焦距 f 、物体 u 和像距 v 之间满足以下公式(1) (凸透镜 $f > 0$):

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

这就是透镜成像公式，由此可知，如果确定了物距和透镜的焦距，我们就能知道像距。对于无限远处的物体，如图 1(a)所示，景物 AB 位于无限远处，即物距 $u = \infty$ ，此时所有光线透过透镜会聚在焦点 F 处，所以图像 A'B' 在焦平面上形成，手机摄像头 CCD (或 CMOS) 传感器就位于焦点处，像距 v 就等于焦距 f 。在本实验中使用 iPhone 4S 手机，查得其焦距 f 为 4.28 mm，则理论上像距 $v = 4.28$ 。

图 1(b) 中景物 AB 位于手机正常拍照距离处，手机相机会有最小的拍照距离，iPhone 4S 手机的最小拍照距离为 65 mm，所以此时 $u \geq 65$ mm。根据凸透镜成像规律，从 B 发出平行于主轴的光线经过透镜发生折射，会经过右侧焦点 F，从 B 发出穿过透镜中心 O 点的入射光线不会发生折射，两束光线在焦点右侧相交，此时景物 AB 在手机摄像头 CCD (或 CMOS) 传感器上形成的缩小影像 A'B' 位于焦点右侧，像距大小在一倍和二倍焦距之间，即 $2f > v > f$ ，图像上下是颠倒过来的，此时在智能手机屏幕上呈现出正立放大(相比传感器上图像)的图像。如果景物此时位于手机相机的最小工作距离附近，例如 $u = 80$ mm，由公式(1)可以计算得出 $v = 4.52$ mm，略大于焦距 4.28 mm，这意味着为了在手机相机传感器上成像，图 1(b) 中摄像头中透镜需要沿光轴向前提微移动，这就是智能手机相机自动对(变)焦的基本工作原理。

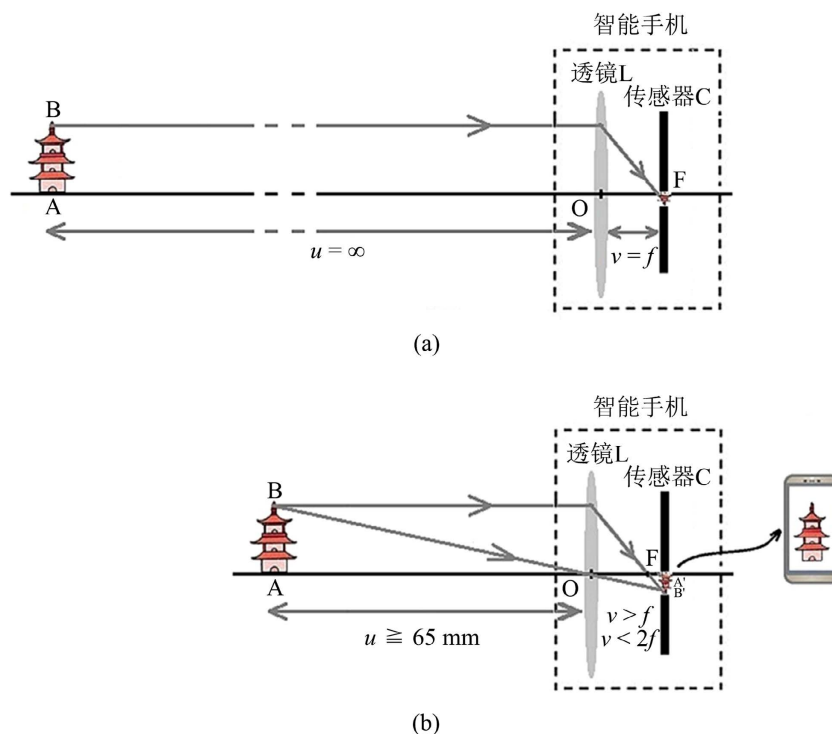


Figure 1. Schematic Diagram of Smartphone Photography and Imaging, (a) The Object Is Located at Infinity, and the Image Appears on the Surface of Lens L Focal Plane C; (b) The Object Is outside the Double Focal Length of the Lens, and the Image Is Inverted and Reduced to the Right of the Focal Plane. It Can Present Upright Enlarged Images on the Mobile Phone Screen

图 1. 智能手机拍照成像示意图, (a) 物体位于无穷远处, 图像出现在透镜 L 的焦平面 C; (b) 物体位于透镜二倍焦距外, 图像倒立缩小在焦平面右侧, 此时智能手机屏幕上呈现正立放大的图像

根据凸透镜成像原理, 我们还可以计算图 1 中透镜拍照成像的放大倍数 γ , γ 等于传感器上图像 $A'B'$ 的尺寸除以景物 AB 的尺寸, 也等于像距 v 除以物距 u , 其关系式如下公式(2):

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{v}{u} = \gamma \quad (2)$$

如果图像 $A'B'$ 大于物体 AB , 放大倍数大于 1, 如果图像 $A'B'$ 小于物体 AB , 放大倍数小于 1。本文中, 联立方程(1)和方程(2), 我们可以推导出透镜拍照放大倍数 γ 和手机摄像头焦距 f 的关系式如下公式(3):

$$\frac{1}{\gamma} = -1 + \frac{u}{f} \quad (3)$$

3. 实验步骤

3.1. 实验仪器

本实验仅需要一部有摄像头的智能手机、一把卷尺、一把游标卡尺和一个大小适中可以用来拍照的物品即可。家中如果没有卷尺可以使用普通米尺替代, 没有游标卡尺可以使用学生塑料尺或者三角板替代, 所用仪器或者用品很简单且易于准备, 非常适合居家完成。

3.2. 实验内容

如我们在图 1(b)中所看到的, 在智能手机摄像头的 CCD (或者 CMOS)传感器上生成图像为倒立的,

仅为几个毫米甚至更小，但是在智能手机屏幕上我们看到的图像却是正立的，而且尺寸要大得多，这中间还经过了数字运算的转换放大。我们在开始动手测量之前，需要计算确定 CMOS 传感器和智能手机屏幕之间的转换放大系数 β ， β 由传感器尺寸和屏幕尺寸的比例决定，他们的具体参数由生产厂家确定，可以在互联网上查找到。本实验中使用智能手机 iPhone4s，其摄像头影像感测组件为 CMOS 传感器，CMOS 传感器和屏幕尺寸分别是： $w_1 \times l_1 = 3.42 \times 4.54 \text{ mm}$ ， $w_2 \times l_2 = 50 \times 75 \text{ mm}$ ，其长度方向转换放大系数计算如下：

$$\beta = \frac{w_2}{w_1} = \frac{75}{4.54} = 16.5 \quad (4)$$

因此屏幕上的图像比摄像头传感器上的图像放大了 16.5 倍(如果我们从智能手机的宽度方向看屏幕，则转换放大系数 $\beta' = w_2/l_1 = 50/4.54 = 11.0$)。除了放大图像，数字运算还将图像反转为正常的方向。

接着我们可以根据下面的步骤进行实验操作：

- 1) 使用游标卡尺测量被拍摄物品圆形盒盖的直径 d 。
- 2) 将盒盖置于地板上，卷尺靠近盒盖并垂直于地板，使用智能手机在距离地板分别为 15 cm、25 cm、35 cm、45 cm、55 cm 和 65 cm 等不同高度 h 处拍摄盒盖，如图 2 所示。我们近似认为盒盖和镜头之间的距离等于盒盖和手机之间的距离，所以高度即为物距，也就是说 $h = u$ 。
- 3) 测量手机屏幕图像上盒盖的直径 d' ，并用数字运算转换放大系数 β 计算出盒盖在 CMOS 传感器上的尺寸 d'' 。

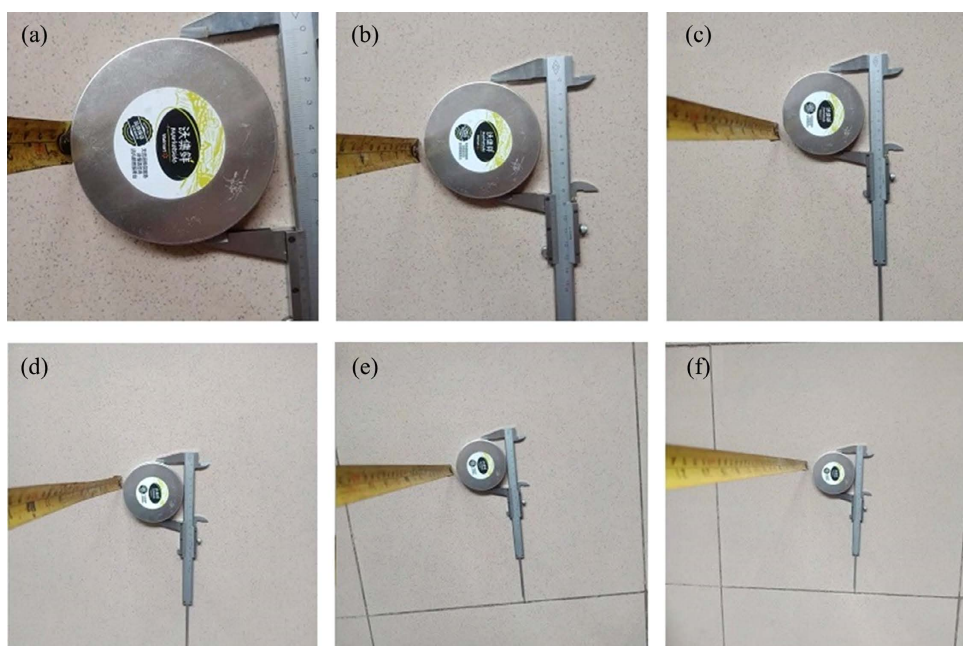


Figure 2. Photos taken with a Smartphone at different heights h (15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm, 55 cm and 65 cm)

图 2. 用智能手机在不同高度 h 处(15 cm、25 cm、35 cm、45 cm、55 cm 和 65 cm)拍摄的照片

4. 实验结果

根据上述实验过程测量得到的盒盖直径 d ，以及在不同高度 h 条件下拍照测量和计算得到的 d' 、 d'' 和 γ 等各项数据都罗列在下表 1 中。

Table 1. Various parameters corresponding to photos taken at different heights $h(u)$

表 1. 不同高度 $h(u)$ 下拍照对应的各项参数

盒盖直径 d (cm)	物距 u /高度 h (cm)	屏幕图像中盒盖 直径 d' (mm)	CMOS 传感器 上盒盖的直径 d'' (mm)	透镜拍照成像 放大倍数 γ	$1/\gamma$
8.390	15.0	41.64	2.52	0.030	33.3
	25.0	25.36	1.54	0.018	55.5
	35.0	16.60	1.01	0.012	83.3
	45.0	13.66	0.83	0.010	100.0
	55.0	10.82	0.66	0.008	125.0
	65.0	9.22	0.56	0.007	142.9

图 3 是使用表 1 中的数据，根据公式(3)线性拟合的放大倍数倒数 $1/\gamma$ 与物距 u 之间的关系图，获得了与理论非常一致的线条，拟合得到的线性方程如下：

$$\frac{1}{\gamma} = -1 + 0.221 \cdot u \tag{5}$$

拟合的线条对应斜率 $a = 1/f = 0.221$ ，可以推导出所用智能手机的焦距 $f = 1/a = 4.52$ mm，该实验测量值与制造商给出的焦距 $f = 4.28$ mm 相比，相对误差不到 6%。

对于大学低年级的学生，如果不会进行线性拟合，还有一个简单的办法进行数据处理，就是将取得的多组数据 (u, γ) 分别代入公式(3)中，分别计算得到多个不同的焦距 f 值，然后计算平均值。

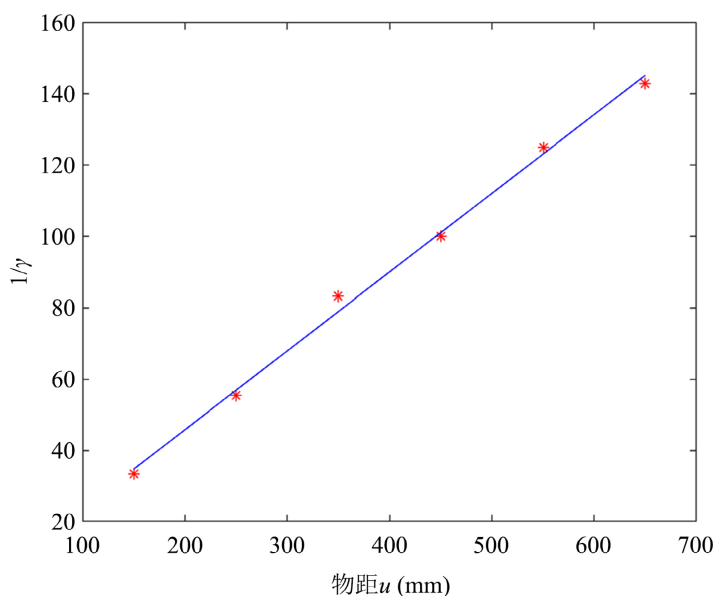


Figure 3. The relationship between the reciprocal of the magnification factor $1/\gamma$ and the object distance u

图 3. 放大系数倒数 $1/\gamma$ 与物距 u 之间关系图

5. 结论

在这里介绍了一个测量智能手机摄像头焦距的简单实验，测量结果误差较小，可以加深学生对几何光学和透镜成像知识的理解。另外，智能手机等生活用品用来当作实验仪器和工具，既增强了物理实验趣味性，又激发了学生的积极性。同时，因为居家物理实验学生有较大的自主设计性和充分的操作性，相对虚拟仿真实验教学效果更好。

基金项目

2020 年武汉科技大学“教学研究重点项目”(2020Z016)。

参考文献

- [1] 王杰. 5G 时代背景下大学物理实验教学改革的研究[J]. 通讯世界, 2020, 27(2): 192-193.
- [2] 王文玲, 陈子瑜, 黄安平, 等. “停课不停学”背景下“基础物理学”线上教学方案探讨[J]. 物理与工程, 2020, 30(5): 32-36.
- [3] 魏心波, 刘德弟, 郑建洲, 等. 新冠疫情期间大学物理实验线上教学——在大连民族大学的实践与探索[J]. 大学物理实验, 2020, 33(6): 108-111.
- [4] 段彬, 张凤琴, 唐笑年. 新冠病毒疫情下大学物理实验线上教学模式的研究[J]. 实验研究与探索, 2021, 40(5): 174-179.
- [5] 徐钱欣, 丁益民, 范兵, 等. 利用智能手机测物体转动惯量的居家 DIY 实验[J]. 物理与工程, 2020, 30(6): 95-99.
- [6] 张澍辰, 朱玲, 梁燕. 居家环境下运用光衍射法测量弹性模量实验的设计[J]. 物理实验, 2021, 41(6): 55-58.
- [7] 张 霆, 刘彩霞, 李建设, 等. 地磁场测量及应用居家实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(2): 176-180.
- [8] 易伟松, 余泉雄, 夏媛惠, 等. 利用智能手机定量测量楼梯电梯高度与垂直速度[J]. 大学物理实验, 2021, 34(2): 20-24.
- [9] Thoms, L.-J., Colicchia, G., Watzka, B. and Girwidz, R. (2019) Electrocardiography with a Smartphone. *The Physics Teacher*, **57**, 586-589.
- [10] Thepnurat, M., Nikonphan, P., Mungkhalad, S., Saphet, P., Supawan, K. and Tong-On, A. (2020) Using a Smartphone Application to Measure the Properties of Water Waves in the DIY Ripple Tank Experiment Set. *Physics Education*, **55**, Article ID: 035011. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab6c3a>
- [11] 李锡均, 程敏熙, 江敏丽. 数字传感器新载体——智能手机在物理实验中的应用综述[J]. 大学物理, 2018, 37(2): 53-59+63.