

用√符号选择一类	
教 学	√
科 研	
编号 (由专家组填写)	

第十一届全国高校物理实验教学研讨会 本科学生物理实验论文评比表

学生姓名： 赵天赐

申报学校： 河北大学

联系方式： 电话： 15130085618

QQ： 1379087543

E-mail： 1379087543@qq.com

填表日期： 2022 年 7 月 7 日

全国高校物理实验教学研讨会组委会制

二〇二〇年一月

学 生 作 者 及 发 表 有 关 物 理 实 验 论 文 情 况	姓名	赵天赐	性别	男	出生年月	2000.01	
	学校名称	河北大学					
	入学时间	2019.09		毕业时间	2023.06		
	学号	20191204043					
	参评论文：	（题目、杂志名称，卷/期、页、年）					
		基于树莓派的单像素成像系统.《大学物理》.第 40 卷第 10 期、77-82 页、2021 年					
		（注：论文的第一作者必须为大学本科，且其论文研究工作是在本科生阶段完成的，到现场答辩的为该论文的学生作者之一。）					
		论文作者情况（按发表论文作者顺序列出）：					
		姓名	身份	单位	作用/贡献		
		何自豪	学生	河北大学	设计电路、撰写论文		
	韩佳成	学生	河北大学	编写程序			
	王琳淼	学生	河北大学	设计电路、撰写论文			
	赵天赐	学生	河北大学	系统搭建，开展实验			
	张素恒	教师	河北大学	指导论文总体工作			

况 **简要介绍** (研究背景、问题、方法、创新点、学术及应用价值和引用情况等):

单像素成像是一种新型的成像技术, 仅利用一个无空间分辨能力的单像素探测器即可获取物体的空间分布信息, 与传统的阵列探测器成像相比, 单像素成像不仅在硬件复杂度和成本控制上具有突出优势, 还有望成为低成本解决红外、太赫兹等非可见光波段成像与极弱光成像等诸多传统成像难题的方案。在关联成像、压缩感知、正交基扫描等多技术的共同推动下, 单像素成像逐渐发展成为一种重要的光电成像类别, 有效弥补了传统光电成像技术的不足。

为了适应光电成像技术的发展, 可以在光电实验教学中引入单像素成像实验。但是目前面向科研的单像素成像系统通常采用桌面计算机作为核心控制单元, 外接空间光场调制器和数据采集卡, 实现光场调制与探测。整套系统比较复杂, 便携性差, 且价格昂贵。另外, 受限于空间光调制器与数据采集卡, 成像系统的软件需要用到闭源专用软件, 可移植性差。

本实验开发了一套基于树莓派的单像素成像系统。该系统以基扫描单像素成像技术为基础, 以树莓派为核心, 并采用 Python 语言进行软件开发, 结构简单, 成本低廉, 可操作性强。本实验系统的创新点包括以下几点:

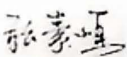


1、采用树莓派对整个系统进行控制, 实现了系统一体化, 从而提高了系统的便携性, 并且树莓派取代了传统单像素成像使用的计算机来进行数据处理, 极大地降低了实验装置成本。

2、数据采集卡通过树莓派的 GPIO 接口, 堆叠到树莓派上, 结构紧凑, 具有非常高的性价比。

3、普通数字投影仪通过 HDMI 接口与树莓派连接, 实现结构光照明, 接口简单, 调用方便, 价格低廉。

4、利用 Python 语言编程, 计算生成结构基底图案, 执行数据采集, 计算重建图像。Python 强大的扩展能力, 有效保障了系统各个功能的高效实现。

整个系统的硬件结构设计紧凑, 成本低廉, 软件开源, 便于操作, 易于推广, 该实验系统的设计也达成了对学生光机电算一体化培养的目标。该实验系统非常适用于单像素成像的原理演示与拓展实验, 为推动单像素成像技术向小型化、实用化方向发展, 实现科研到教学的转化起到积极作用。目前本文所开发的实验系统已获实用新型专利 2 项 (ZL202120568244.5, ZL202220551762.0), 完成河北大学开放实验室项目 1 项、河北大学创新创业训练计划项目 1 项。截止到今天, 本文在中国知网的下载量达 241 次, 在国内光电实验教学领域引起了一定关注。

	指导教师姓名	张素恒	职称	副教授
指导教师评语	对学生发表论文评语及论文情况说明： 本论文是由四位河北大学光电专业的本科生利用课余时间，在光电开放实验室完成的创新成果。从实验系统的设计、搭建、完善到论文、专利写作，对学生是全方位锻炼，同学们也受益于此。论文作者中 3 位同学已毕业并读研于中国科技大学、西北工业大学和河北大学，此次参与论文评比的赵天赐同学正在备考。 本论文设计并实现了基于树莓派的单像素成像系统。首先给出 Hadamard 基扫描与 Fourier 基扫描单像素成像的原理，然后分别介绍了系统的硬件结构与相应的程序流程，还展示了该系统分别对校名与校徽的成像效果。 该系统以基扫描单像素成像技术为基础，以树莓派为核心，并采用 Python 语言进行软件开发，结构简单，成本低廉，可操作性强，非常适合光电信息相关专业的实验教学，具有很高的实用价值和推广应用前景。			
	指导教师（签名）：			2022 年 07 月 06 日
学校推荐意见	负责人（签名）：  公章  年 月 日			
大会学术组专家意见	专家组组长（签名）： 年 月 日			
评比结果	理事长（签名） 年 月 日			

基于树莓派的单像素成像系统

何自豪 韩佳成 王琳森 赵天赐 张素恒

(河北大学 物理科学与技术学院 河北 保定 071002)

摘要: 本文提出了一种基于树莓派的单像素成像系统.该系统以基扫描单像素成像技术为基础,以树莓派为核心,结构简单,成本低廉,可操作性强,非常适合应用于实验教学中.本文首先给出了基扫描单像素成像的原理,然后分别从硬件和软件两个方面对系统结构进行了详细介绍,最后展示了哈达玛和傅里叶单像素成像实验结果.本工作为开展光信息处理实验提供了一个新思路.

关键词: 单像素成像; 树莓派; 傅里叶变换; 沃尔什-哈达玛变换

中图分类号: O 4-39 文献标识码: A 文章编号: 1000-0712(2021)10-0077-06

【DOI】10.16854/j.cnki.1000-0712.210024

近年来,单像素成像技术作为一种新型成像技术引起广泛关注.单像素成像与传统的阵列探测器成像相比,其图像信息的获取方式与采集效率不同,在硬件复杂度和工业成本方面占有一定优势,对于推动未来成像系统的简化和集成,具有潜在应用前景.现阶段,阵列传感器在红外、太赫兹波段的应用并不成熟,并且三维成像、光谱成像对器件的分辨率和灵敏度要求苛刻,其应用受到限制,因此单像素成像技术的出现,为解决这些问题带来了新的途径.

单像素成像发展至今,先后经历了计算鬼成像、基于压缩感知的单像素成像和基扫描单像素成像 3 个阶段^[1].基扫描单像素成像是使用确定性的正交变换基底图案进行空间光调制的成像方法.通过采用完备的基底图案进行空间光调制,可以无失真地重构物体的像,这是该成像方法的显著优势.2015 年,李明飞等人提出了基于沃尔什-哈达玛变换的单像素成像方案^[2],之后他们又研究了矩阵优化排序的压缩采样快速成像方案^[3].2016 年,张子邦等人引入了傅里叶单像素成像技术^[4-6].此外,他还对比了傅里叶单像素成像与哈达玛单像素成像在欠采样情况下的成像质量^[7].2016 年,Liu Bao-Lei 等人提出基于离散余弦变换的单像素成像方案^[8].2017 年,Rousset L 等人又提出基于小波预测的自适应基扫描单像素成像方案^[9].这些基扫描成像方案极大的推动了单像素成像技术实用化进程.

虽然国内外在单像素成像领域已经开展了大量的研究工作,提出多种成像系统.但这些单像素成像系统集成度较高,可操作性差,价格昂贵,不利于在实验教学中推广.本文提出了一种基于树莓派的单像素成像系统.该系统以基扫描单像素成像技术为基础,以树莓派为核心,并采用 Python 语言进行软件开发,结构简单,成本低廉,可操作性强,非常适合实验教学.本文首先介绍基扫描单像素成像的原理,然后分别从硬件和软件两个方面详细介绍系统结构,最后展示哈达玛和傅里叶两种基扫描单像素成像实验结果.

1 基扫描单像素成像原理

基扫描单像素成像依次向物体投影一套完备的正交变换基底图案,并逐一测量每一基底图案照明时物体的漫反射光强,从而获取物体的各个频谱分量,再通过逆变换重建物体的像.

1.1 哈达玛单像素成像

二维的哈达玛变换与其逆变换定义为

$$\hat{F} = HFH \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{N^2} H \hat{F} H \quad (2)$$

其中 F 与 \hat{F} 分别代表物体的采样矩阵与其频谱矩阵,它们的行列数均为 N . H 为 N 阶沃尔什序哈达玛矩阵.哈达玛变换式(1)可展开为

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 河北大学大学生创新创业训练计划项目以及河北大学优秀本科毕业论文教改项目资助

作者简介: 何自豪(2000—)男,河北邯郸人,河北大学物理科学与技术学院电子信息科学与技术专业 2017 级本科生.

通信作者: 张素恒, E-mail: shzhang@hbu.edu.cn

$$\hat{F}(u, p) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} H(u, x) F(x, y) H(y, p) \quad (3)$$

式中 $u, p=0, 1, \dots, N-1$, $F(x, y)$ 和 $\hat{F}(u, p)$ 分别为物体采样矩阵 F 与其频谱矩阵 \hat{F} 的矩阵元, $H(u, x)$ 与 $H(y, p)$ 均为哈达玛矩阵 H 的矩阵元. 清楚起见, 引入哈达玛变换基底矩阵序列

$$\{P_{uv} \mid u, p=0, 1, \dots, N-1\} \quad (4)$$

其中基底矩阵 P_{uv} 的矩阵元为

$$P_{uv}(x, y) = H(u, x) H(y, p) \quad (5)$$

其中 $x, y=0, 1, \dots, N-1$. 若将哈达玛矩阵 H 的第 u 行和 v 行的行向量分别记为 H_u 与 H_v , 则由式(5)可知, 基底矩阵 P_{uv} 还可表示为

$$P_{uv} = H_u^T H_v \quad (6)$$

考虑到哈达玛矩阵 $H^T = H$, 这时式(3)可表示为

$$\hat{F}(u, p) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(x, y) P_{uv}(x, y) = \langle F, P_{uv} \rangle_F \quad (7)$$

其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle_F$ 代表 Frobenius 内积. 由式(7)可知, 只要逐一计算物体采样矩阵与基底矩阵序列中每一基底矩阵的内积, 即可得到物体的哈达玛频谱.

在单像成像中, 首先根据基底矩阵序列生成基底图案序列, 然后再将所有基底图案逐一投影到物体上形成结构光照明, 最后利用单像素探测器记录物体的漫反射光强, 即可获取物体完备的频谱. 由于结构光照明是对光强调制, 无法直接表达哈达玛基底矩阵中的负值. 通常采用差分法来解决该问题. 于是将每个基底矩阵 P_{uv} 转化为两幅基底图案

$$\begin{aligned} P_{uv}^{(+)} &= \frac{1}{2}(1 + P_{uv}), \\ P_{uv}^{(-)} &= \frac{1}{2}(1 - P_{uv}) \end{aligned} \quad (8)$$

然后把这两幅基底图案依次投影到物体上, 单像素探测器测得的漫反射物光强分别为

$$\begin{aligned} D^{(+)}(u, p) &= k \langle F, I_0 P_{uv}^{(+)} + I_b \rangle_F, \\ D^{(-)}(u, p) &= k \langle F, I_0 P_{uv}^{(-)} + I_b \rangle_F \end{aligned} \quad (9)$$

其中 I_0 为投影光源的强度, I_b 为不受调制的背景光强度分布矩阵, k 是探测器的光电响应系数. 通过差分即可得到相应的哈达玛频谱分量,

$$\hat{F}(u, p) = \alpha [D^{(+)}(u, p) - D^{(-)}(u, p)] \quad (10)$$

其中 $\alpha = 1/kI_0$. 此外, 差分还能去除背景光影响.

在成像过程中, 依次向物体投影整套基底图案

$$\{P_{uv}^{(+)}, P_{uv}^{(-)} \mid u, p=0, 1, \dots, N-1\} \quad (11)$$

测得漫反射物光强序列为

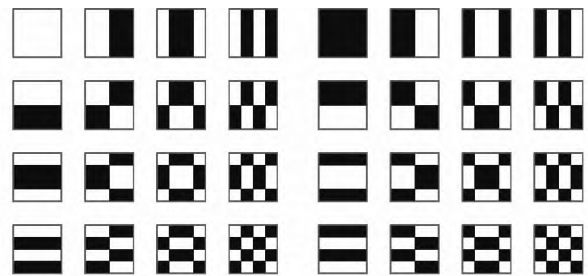
$$\{D^{(+)}(u, p), D^{(-)}(u, p) \mid u, p=0, 1, \dots, N-1\} \quad (12)$$

从而得到物体的哈达玛频谱矩阵,

$$\hat{F} = \alpha [D^{(+)} - D^{(-)}] \quad (13)$$

最后再利用式(2)对频谱矩阵进行逆变换即可获取物体的重构像.

利用差分哈达玛单像素成像时, 若像的分辨率为 $N \times N$, 则需投影 $2N^2$ 张基底图案. 图1展示了 4×4 像素的整套哈达玛基底图案, 其中(a)与(b)分别为基底图案序列 $\{P_{uv}^{(+)}\}$ 和 $\{P_{uv}^{(-)}\}$, 各16幅, 共32张. 实验中投影大量的基底图案将非常耗时, 当物体的细节不太丰富时, 可采取欠采样的成像, 仅测量物体频谱中一定范围内的低频分量, 而将高频分量直接置零. 具体的采样策略可参考文献^[7]. 采用沃尔什序的哈达玛矩阵, 方便进行欠采样成像^[2, 10].



(a) 基底图案 $\{P_{uv}^{(+)}\}$

(b) 基底图案 $\{P_{uv}^{(-)}\}$

图1 差分哈达玛单像素成像基底图案(4×4像素)

哈达玛单像素成像的空间采样间隔由投影到物体上的基底图案的最小结构单元的尺寸来决定. 通过最近邻域法放大基底图案和调整投影距离均可改变空间采样间隔, 以获得最佳的成像效果.

1.2 傅里叶单像素成像

二维离散傅里叶变换定义为

$$\hat{F}(u, p) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(x, y) \exp \left[-i2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (14)$$

其中 $u=0, 1, \dots, M-1$; $v=0, 1, \dots, N-1$, M 与 N 分别为物体采样矩阵 F 的行列数. 二维离散傅里叶逆变换定义为

$$F(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \hat{F}(u, p) \exp \left[i2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (15)$$

其中 $x=0, 1, \dots, M-1$; $y=0, 1, \dots, N-1$. 考虑到离散傅里叶变换的周期性, 引入离散傅里叶变换基底矩阵序列

$$\left\{ T_{uv} \begin{array}{l} u=0; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1, \lceil M/2 \rceil; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1 \\ v=0; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1, \lceil N/2 \rceil; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1 \end{array} \right\} \quad (16)$$

其中基底矩阵 T_{uv} 的矩阵阵元为

$$T_{uv}(x, y) = \exp \left[-i2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} x &= -\lceil M/2 \rceil; \dots, 0; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1, \\ y &= -\lceil N/2 \rceil; \dots, 0; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1 \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 与 $\lceil \cdot \rceil$ 分别代表向下取整运算与向上取整运算. 二维离散傅里叶变换式 (14) 可表示为

$$\hat{F}(u, v) = \langle F, T_{uv} \rangle_F \quad (19)$$

由式 (19) 可知, 物体的离散傅里叶频谱可通过计算物体采样矩阵与基底矩阵序列所有基底矩阵的内积获得.

由式 (17) 可知, 离散傅里叶变换基底矩阵为复矩阵. 为了通过光强调制表达该基底矩阵, 通常借助于四步相移法. 首先将基底矩阵序列中的每个基底矩阵 T_{uv} 经相移后转化为四幅余弦基底图案

$$T_{uv}^{(\varphi)} = \frac{1}{2} \{ 1 + \text{Re} \{ T_{uv} e^{i\varphi} \} \}, \left(\varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \right) \quad (20)$$

其中 $\text{Re} \{ \cdot \}$ 代表取实部. 然后把这四幅基底图案依次投影到物体上, 单像素探测器测出的漫反射物光强分别为

$$D^{(\varphi)}(u, v) = k \langle F, I_0 T_{uv}^{(\varphi)} + I_b \rangle_F, \left(\varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \right) \quad (21)$$

由欧拉公式可计算出相应的频谱分量

$$\hat{F}(u, v) = \alpha \{ [D^{(0)}(u, v) - D^{(\pi)}(u, v)] - i [D^{(\pi/2)}(u, v) - D^{(3\pi/2)}(u, v)] \} \quad (22)$$

可以看出, 四步相移法的本质仍为差分运算, 同样可以消除背景光的影响.

在基于傅里叶变换的单像素成像过程中, 依次向物体投影整套余弦基底图案

$$\left\{ T_{uv}^{(\varphi)} \begin{array}{l} \varphi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2 \\ u=0; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1, \lceil M/2 \rceil; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1 \\ v=0; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1, \lceil N/2 \rceil; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1 \end{array} \right\} \quad (23)$$

测得漫反射物光强度序列为

$$\left\{ D^{(\varphi)}(u, v) \begin{array}{l} \varphi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2 \\ u=0; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1, \lceil M/2 \rceil; \dots, \lceil M/2 \rceil - 1 \\ v=0; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1, \lceil N/2 \rceil; \dots, \lceil N/2 \rceil - 1 \end{array} \right\} \quad (24)$$

从而得到物体的离散傅里叶频谱矩阵

$$\hat{F} = \alpha \{ [D^{(0)} - D^{(\pi)}] - i [D^{(\pi/2)} - D^{(3\pi/2)}] \} \quad (25)$$

然后再对频谱矩阵进行逆变换, 则有

$$F_c = \text{ifft}(\hat{F}) \quad (26)$$

式中 ifft 代表二维离散傅里叶逆变换. 但这时得到的重构像 F_c 中心位于矩阵左上角, 不便观察. 考虑到离散傅里叶变换的周期性, 通过 fftshift 操作对重构像进行调整, 即

$$F = \text{fftshift}(F_c) \quad (27)$$

最终获得物体的重构像.

在利用 4 步相移的傅里叶单像素成像时, 若像的分辨率取为 $M \times N$, 则需投影 $4M \times N$ 张基底图案. 图 2 展示了 4×4 像素的傅里叶基底图案, 其中 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别为余弦基底图案序列 $\{T_{uv}^{(0)}\}$ 、 $\{T_{uv}^{(\pi/2)}\}$ 、 $\{T_{uv}^{(\pi)}\}$ 和 $\{T_{uv}^{(3\pi/2)}\}$, 各 16 幅, 共 64 张. 为清楚显示, 生成基底图案时已经对离散坐标序进行线性插值, 使坐标点数增加至 1024. 在相同分辨率下, 四步相移的傅里叶单像素成像基底图案数量是差分哈达玛单像素成像基底图案数量的 2 倍.

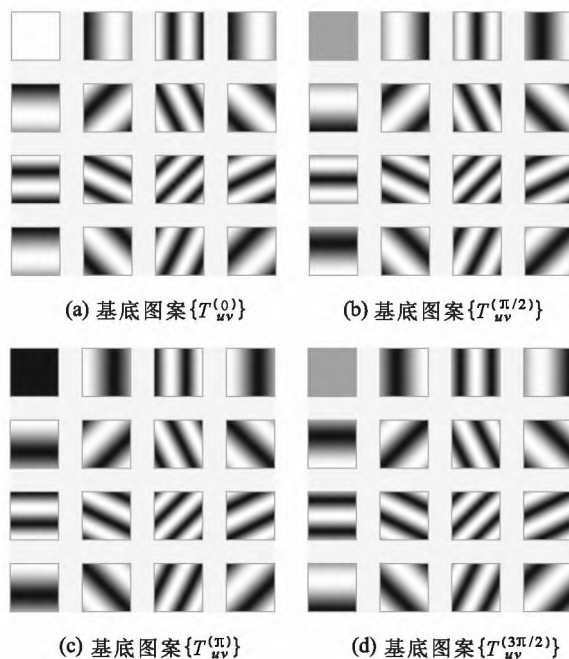


图 2 四步相移傅里叶单像素成像基底图案 (4×4 像素)

考虑到物体的分布函数 (物体光强反射率) 为实值函数, 物体采样矩阵的傅里叶频谱满足共轭对称性, 即

$$\hat{F}(u, v) = \hat{F}^*(-u, -v) \quad (28)$$

因此,可以仅测量频谱中的零频及负频分量,再用式(28)补全正频分量,从而获得完整的频谱^[6]。这时测量次数可减少一半。当物体的细节不太丰富时,还可以进行欠采样成像,进一步减少测量次数,加快成像速度,详见参考文献^[7]。

当 u 与 v 均取最大值时,即

$$|u_m| = \lfloor M/2 \rfloor, |v_m| = \lfloor N/2 \rfloor \quad (29)$$

余弦基底图案空间频率最高。投影到物体上的该余弦条纹沿 x 方向与 y 方向空间周期的一半即为傅里叶单像素成像的空间采样间隔。对式(18)中离散坐标序列进行线性取值,可以放大基底图案,进而改变成像的空间采样间隔。此外,还可以通过调整投影距离改变成像的空间采样间隔。

2 基于树莓派的单像素成像系统设计

树莓派是为普及计算机编程教育而设计的基于 ARM 架构的微型电脑,其体积小、价格低、接口丰富、性能强大。树莓派的操作系统 Raspberry Pi OS 基于 Linux 完全开源,功能完备,并且预置了 Python 的开发环境。因此,它非常适合编程学习和创客开发。本文提出在实验教学中利用树莓派代替传统计算机搭建单像素成像系统,非常有利于锻炼学生的动手能力,培养其创新思维。

2.1 硬件设计

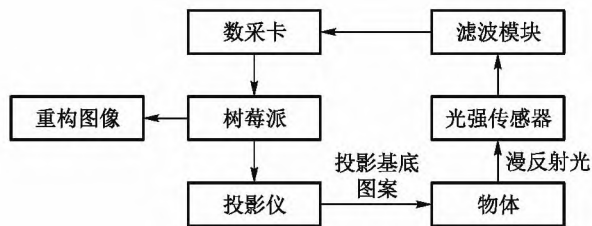


图3 硬件系统框图

硬件系统如图3所示,主要由3部分组成:控制单元、图像投影单元和数据采集单元。系统的核心是控制单元,由树莓派(4B)构成。控制单元主要负责生成基底图案,控制投影和数据采集,进行数据处理与计算重构图像。图像投影单元由米家激光投影仪(L185JCN)构成,通过HDMI接口与树莓派连接。投影单元将树莓派发送来的基底图案投影到物体上。数据采集单元由光强传感器(OPT101)、滤波模块与数据采集卡(MCC-118)3个部分构成。光强传感器将基底图案照明下的漫反射物光强度转换为电压信号输送给滤波模块。滤波模块是由RC滤波电路构成的低通滤波器,它可将光电转换过程中产生的大

量噪声去除。经滤波后的电压信号送给数据采集卡,由采集卡进行模数转换。数据采集卡通过GPIO接口与树莓派连接,它在树莓派的控制下进行数据采集,并将采集到的光强数据回传给树莓派。

整个系统成本较低,其中树莓派(4B)380元,数采卡(MCC-118)990元,光强传感器(OPT101)4元,米家激光投影仪(L185JCN)5000元,合计6374元。在演示实验中,可采用多媒体教室的投影仪^[11]总成本可降至1500元以内。

2.2 程序设计

单像素成像系统程序采用Python语言开发,它简洁、易读,并且具有强大的扩展能力。程序主要完成基底图案生成与显示,数据采集,图像重构等操作。程序流程如图4所示。

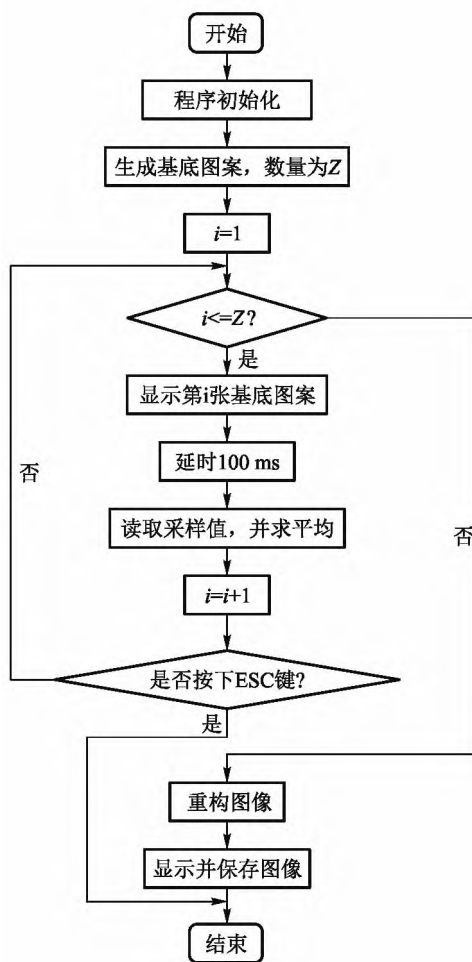


图4 程序流程框图

程序开始运行后,首先执行初始化操作,包括导入科学计算库、数据采集库与图像显示库,实例化采集卡并设定采集参数,初始化显示模块并设定显示参数。然后构建一个生成器(generator)用于迭代生

成全部基底图案,以避免大量的内存消耗.接下来迭代显示每一张基底图案,在循环过程中,每显示一张基底图案,先延时 100 ms,待图像显示稳定后,再进行数据采集.对于每幅基底图案,将以 10^{-4} s 的采样速率,采集 400 个样本,再对这 400 个样本求平均,作为该幅基底图案照明时的漫反射物光强度.当循环显示全部基底图案后,计算重构图像,并将重构图像保存并显示在屏幕上.

3 实验验证

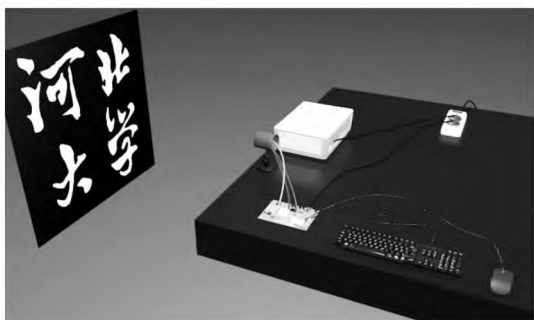


图 5 实验装置图

按照上述的系统设计方案,开发了如图 5 所示的实验装置,来验证设计方案的可行性.实验中,将河北大学校名与校徽制作成剪纸置于黑色幕布上作为物体,如图 6 所示.两物体大小相同,长宽均为 0.6 m.实验采用哈达玛与傅里叶两种基扫描单像素成像方式分别对这两个物体成像.

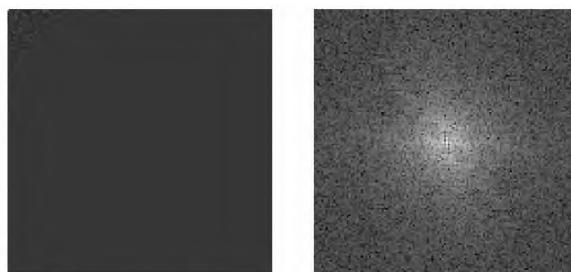


(a) 河北大学校名 (b) 河北大学校徽

图 6 待成像物体 物体的长与宽均为 0.6 m

在对河北大学校名进行成像时,取像的分辨率为 128×128 像素.采用哈达玛单像素成像时,直接生成的哈达玛基底图案大小仅为 128×128 像素.为了便于投影,首先按最近邻域法将图像放大到 1024×1024 像素,再加载到投影仪上显示.然后调整投影仪与物体的距离,使幕布上的基底图案刚好完整覆盖物体.投影仪逐一投影全部 $128 \times 128 \times 2$ 张基底图

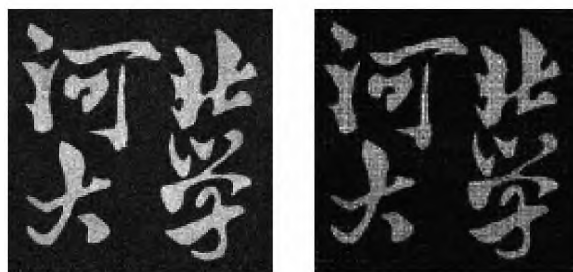
案,利用式(13)对测量数据进行差分处理即可得到物体的哈达玛频谱,如图 7(a) 所示.



(a) 哈达玛频谱图 (b) 傅里叶频谱图

图 7 物体频谱图

对测得的哈达玛频谱矩阵再按式(2)进行逆变换,即重构出物体的像,如图 8(a) 所示.在傅里叶单像素成像时,取式(18)中的 $M=N=128$,先对离散坐标序列 x 和 y 进行插值,使坐标点数增加至 1024,再按照式(17)计算出傅里叶基底矩阵,再生成全部 $128 \times 128 \times 4$ 张基底图案进行投影显示.利用式(22)对测量数据进行处理即可得到物体的傅里叶频谱,如图 7(b) 所示.为清楚显示谱频分布,该图为原频谱进行对数变换后的结果.物体的傅里叶频谱矩阵再经过式(26)与式(27)变换后最终得到物体的重构图像,如图 8(b) 所示.从图 8 可以看出,在该分辨率下,在两种成像方式均可获取高质量的像,字样的细节清晰,对比度也比较高.

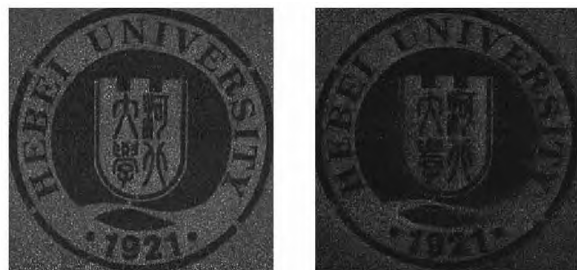


(a) 哈达玛变换 (b) 傅里叶变换

图 8 河北大学校名的成像结果,分辨率为 128×128 像素

当对河北大学校徽成像时,取分辨率为 256×256 像素,成像结果如图 9 所示.这时两种成像方式均可完整呈现物体丰富的细节,但成像的对比度有不同程度的下降.对比图 8 与图 9 两组实验结果可以看出,哈达玛变换成像质量明显优于傅里叶变换的成像质量.这是因为傅里叶基底矩阵连续取值,在生成数字化的基底图案过程中会引入量化误差,在投影仪投影该灰度图像时又会引入非线性误差.而

哈达玛基底矩阵是二值矩阵,不会受上述噪声的影响,因而哈达玛单像素成像具有较高的成像质量.



(a) 哈达玛变换

(b) 傅里叶变换

图9 河北大学校徽成像结果,分辨率为 256×256 像素

最后需要指出的是,上述所有成像结果,均未进行任何后期处理.若根据系统噪声特性与物体特征对像进行降噪增强处理,则成像质量将会进一步提升.

这两组实验结果表明,本文提出的基于树莓派的单像素成像方案合理可行,能够对物体高质量成像.

4 结论

以基扫描单像素成像为基础,本文设计并开发了一套基于树莓派的单像素成像系统.利用该系统成功实现哈达玛单像素成像与傅里叶单像素成像,验证了设计方案的可行性.系统硬件结构紧凑,成本低廉,易于推广;系统程序由Python语言开发,清晰简洁,易于拓展.因此,该系统非常适用于单像素成像的原理演示与实验教学.另外,本工作还能推动单像素成像技术走出科研实验室,向小型化、实用化发展.

参考文献:

- [1] Gibson G M, Johnson S D, Padgett M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28190.
- [2] 李明飞,莫小范,赵连洁,等.基于Walsh-Hadamard变换的单像素遥感成像[J]. *物理学报*, 2016, 65(6): 064201.
- [3] 李明飞,阎璐,杨然,等.基于Hadamard矩阵优化排序的快速单像素成像[J]. *物理学报*, 2019, 68(6): 064202.
- [4] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6225.
- [5] Zhang Z, Wang X, Zheng G, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12029.
- [6] 张子邦,陆天傲,彭军政,等.傅里叶单像素成像技术与应用[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0603002.
- [7] Zhang Z, Wang X, Zheng G, et al. Hadamard Single-Pixel Imaging versus Fourier Single-Pixel Imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619.
- [8] Liu B L, Yang Z H, Liu X, et al. Coloured computational imaging with single-pixel detectors based on a 2D discrete cosine transform [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(3): 259-264.
- [9] Rousset F, Ducros N, Farina A, et al. Adaptive basis scan by wavelet prediction for single-pixel imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(1): 36-46.
- [10] 宋新兵.基于Hadamard基的欠采样计算鬼成像[J]. *大学物理*, 2020, 39(8): 21-24.
- [11] 刘江涛,童红,李伟民,等.在多媒体教室中实现热光鬼成像[J]. *大学物理*, 2018, 37(3): 44-47.

Single-pixel imaging system based on Raspberry Pi

HE Zi-hao, HAN Jia-cheng, WANG Lin-miao, ZHAO Tian-ci, ZHANG Su-heng

(College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: In this paper, a single-pixel imaging system based on Raspberry Pi is proposed. The proposed system takes the Raspberry Pi as the core and the base-scan single-pixel imaging technology as the basis, which has a simple structure, low cost, and strong operability. Therefore, it is very suitable for application in experimental teaching. First, the principle of the base-scan single-pixel imaging is given, and then the system structure is introduced in detail from the aspects of hardware and software. Finally, the experimental results of Hadamard and Fourier single-pixel imaging are shown. This work provides a new idea for carrying out optical information processing experiments.

Key words: single-pixel imaging; Raspberry Pi; Fourier transform; Walsh-Hadamard transform