基于环型孔径超薄透镜的微光学标签接收系统

戈 兰 梁忠诚

南京邮电大学光电工程学院,江苏南京 210003

摘要 设计了微光学标签的接收系统,提出采用大孔径长焦距的环型孔径超薄透镜作为系统接收端手机镜头的思路, 用Zemax软件设计得到了4次折返环型孔径透镜。透镜前后表面为多个环型非球面反射镜,外直径为28 mm,有效焦 距为36 mm,镜头厚度为7.6 mm,在有限的厚度和重量内得到较大的有效焦距和孔径,实现超薄特性。有效增加了系 统的接收距离,实现了手机对微光学标签的远距离接收。采用基于OpenCV计算机视觉库的VC 6.0平台开发了图像 畸变校正的程序,对不同接收距离情况下有一定径向畸变的模拟接收图像分别进行修正并准确解码获取所需信息。 关键词 光学设计;微光学标签;环型孔径超薄透镜;畸变校正

中图分类号 0439 文献标识码 A doi: 10.3788/A0S201535.1222001

Micro-Optics Label Receiving System Based on Annular Aperture Ultra-Thin Lens

Ge Lan Liang Zhongcheng

School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China

Abstract The micro-optics label receiving system is designed, a large aperture and long focal length lens called annular aperture ultra-thin lens which is used as mobile phone lens of system receiving terminal is proposed, a four-reflection folded annular aperture lens is designed with Zemax. Front and rear surfaces of lens are annual aspheric mirrors, the outer diameter of lens is 28 mm, the effective focal length is 36 mm and the thickness of lens is 7.6 mm. This lens has large effective focal length, long aperture and ultra-thin characteristics in limited thickness and weight. Thus, a long distance receiving of micro-optical label with the mobile phone is obtained. Furthermore, a image distortion correction program is developed on VC 6.0 platform based on the OpenCV computer vision library, the radial distortion of receiving image simulation is modified and decoded accurately in order to obtaining the required information.

Key words optical design; micro-optics label; annular aperture ultra-thin lens; rectification of image distortion **OCIS Codes** 220.3620; 350.3950; 060.4510; 100.2960

1 引 言

随着物联网技术的发展与进步,标签信息识别技术遍布日常生活和工作的各个领域,人们因此可以方便 地获取所需信息。目前使用较多的是条形码技术^{III},射频识别技术^{I2I}(RFID)近年来也越来越受到人们的关注,但 前者有存储信息数据量不足的问题,后者存在一定的安全隐患问题。2009年麻省理工学院Ankit^{I3I}提出Bokode 微光学标签技术,它存储的数据要比同样尺寸条形码多近400倍,而且还没有RFID的安全疑虑,具有轻型化、 大容量及安全性高等优点。2011年起,南京邮电大学光电工程学院设计并制作了有源、无源和集成化微光学 标签系统^[4-6],但用手机镜头接收时,接收距离受到很大限制。本文主要对接收端手机镜头进行设计,通过环型

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-06-18

作者简介: 戈 兰(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail:gelangl@163.com

导师简介:梁忠诚(1958—),男,教授、博士生导师,主要从事物理学和光电子技术方面的研究。

E-mail:zcliang@njupt.edu.cn(通信联系人)

折叠的方式实现超薄的大孔径长焦距透镜,并将这种透镜用作微光学标签系统的接收端镜头,可以增加接收 距离,实现手机对微型标签码的远距离接收,便于微光学标签系统在日常生活中得到推广应用。

2 微光学标签的结构与原理

微光学标签系统主要由发射端、无线传输信道和接收端组成¹³,如图1所示,当相机物镜焦距大于标签透镜 焦距时,可以获得一个相对原始微型标签放大的像,其放大倍率取决于相机物镜与标签透镜焦距的比值f_b/f_a。



Fig.1 Structure diagram of micro-optics label system

研究表明,系统能够正确解码的接收距离范围正比于相机物镜的孔径D和焦距f_b。对目前设计的一种 集成式微光学标签⁶⁰采用一般手机镜头接收时,只有接收距离L在8~21 mm范围内才能够被正确接收和解 码。为了增加系统的接收距离和成像分辨率,需要采用大孔径、长焦距接收镜头,这就限制了微型光学标签 的应用范围。

3 环型孔径超薄透镜与微光学标签系统

美国加州大学圣地亚哥分校的Tremblay等^[7-9]在2005年研究并制造了一种环型孔径多次反射型超薄镜头,该透镜与具有相同通光孔径面积和焦距的传统透镜相比重量和厚度都小得多。例如4次折返环型孔径 超薄透镜的尺寸与25美分硬币相当^[8],完全可以应用于手机。

3.1 4次折返环型孔径透镜

环型孔径超薄透镜是改进型格里高利天文望远物镜的扩展,光线从透镜边缘的环型孔径进入,通过透 镜前后环型反射面的反射镜多次反射,最后成像在光学系统像面的图像传感器上。该透镜通过光线在系统 中的多次折返确保在有限的厚度和质量内得到较大的有效孔径和焦距,实现其超薄的特性。

4次折返环型孔径透镜前后反射面为多个高次非球面^{110]}。Zemax软件中偶次非球面主要由下式定义:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + a_1r^4 + a_2r^6 + a_3r^8 + a_4r^{10} + a_5r^{12} + a_6r^{14} + a_7r^{16}\cdots,$$
(1)

式中*c*代表非球面顶点的曲率(1/*R*₀),*k*代表二次曲面常数,*r*代表距离光轴的水平距离,*a*₁~*a*₇为非球面修正系数。 用Zemax软件仿真该透镜,只有透镜和成像物体系统的孔径光阑是环型孔径超薄透镜,视场光阑是物平

面。确定系统参数:系统入瞳直径为28 mm,视场角为17°,有效焦距为36 mm,基底材料选择CaF₂,工作波长为0.486、0.587、0.656 mm。如图2(a)所示,由于共轴反射系统存在中心遮拦,只有入射到图中白色部分所示



图 2 环型孔径超薄透镜结构。(a)环型孔径遮拦示意图;(b) 4次折返环型孔径超薄透镜结构图

Fig.2 Structure of annular aperture ultra-thin lens. (a) Schematic diagram of annular aperture obscuration; (b) structure diagram of four-reflection annular aperture ultra-thin lens 环型孔径的光线才能进入系统。图中D表示透镜的外直径,d表示遮拦部分的直径,即透镜的内直径,w表示 环型孔径宽度。图 2(b)为仿真得到的 4次折返环型孔径超薄透镜的结构图。

3.2 环型超薄透镜与微光学标签系统

将上述4次折返环型孔径超薄透镜用作微光学标签系统接收端镜头,为确保能够接收到微型标签码的 全部信息且获得较高的成像照度和分辨率,希望组合系统的孔径光阑为标签透镜,视场光阑为微型标签码。系统的基本参数确定为:接收距离L₀=124 mm,系统入瞳直径(即标签透镜的孔径)为3 mm,视场角为 12°。设计得到的微光学标签系统参数和4次环型孔径透镜的反射非球面参数分别如表1和表2所示。

Parameter	Value	Parameter	Value
Length of micro 2D barcode b	2 mm	Outer diameter of annular aperture lens D	28 mm
Diameter of label lens a	3 mm	Effective focal length of receiving lens $f_{\rm D}$	36 mm
Focal length of label lens f_{a}	10 mm	System entrance pupil	3 mm
Design receiving distance L_0	124 mm	System FOV	12°

表1 系统的参数 Table 1 System parameters

表2 透镜反射非球面参数

Table 2 Reflective aspheric surface parameters details of lens

A 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Reflective aspheric surface serial number			
Aspheric correction coefficient	1	2	3	4
a_1	2.585×10 ⁻³	-2.129×10 ⁻²	-1.111×10 ⁻²	6.435×10 ⁻⁴
a_2	-1.892×10 ⁻⁵	1.388×10 ⁻⁴	4.827×10 ⁻⁵	-1.792×10 ⁻⁴
a_3	2.626×10 ⁻⁷	-6.527×10 ⁻⁷	-2.099×10 ⁻⁷	3.575×10 ⁻⁶
a_4	-8.381×10^{-10}	1.595×10 ⁻⁹	-6.761×10 ⁻⁹	-8.093×10 ⁻⁷
a_5	5.643×10 ⁻¹³	5.753×10 ⁻¹³	8.805×10 ⁻¹¹	4.224×10 ⁻⁸
a_6	4.047×10 ⁻¹⁵	-1.657×10^{-14}	-4.847×10^{-13}	-1.176×10 ⁻⁹
a_7	-8.548×10^{-18}	1.184×10 ⁻¹⁷	1.056×10 ⁻¹⁵	1.196×10 ⁻¹¹
Radius of curvature	-27.49	-939.5	-261.9	-36.52

该系统在接收距离为124 mm时,仿真得到的物像对比如图3所示。遮拦是影响共轴反射光学系统性能的一个重要原因,遮拦越大,光能利用率和成像质量越差,甚至会减小光学系统能成像的视场。由于4次折返环型超薄透镜次镜(2次反射面)的中心遮拦,影响了成像亮度的均匀性,但图3(b)所示的模拟微型标签成像 图可以用手机解码软件正确识别,如图3(c)所示。通过仿真发现当接收距离偏离设计距离L。位置时,图3(d) 是接收距离为122 mm系统的接收图像,图像发生一定的径向畸变,使得不能被正确识别并解码。因此需要 解决畸变的校正问题并分析畸变与接收距离的关系。

4 接收像畸变校正

4.1 径向畸变的定义

由于光学系统的成像并不是理想的小孔成像,物点的实际成像与理想成像之间存在一定的畸变误差。 光学镜头的径向曲率的不稳定是引起图像发生径向变形的主要原因。该系统存在的主要是径向畸变,这种 畸变会引起图像点的径向位置的移动,离畸变中心越远,变形越严重,它包括桶形畸变和枕形畸变。

图像的径向畸变^四可表示为:

$$\begin{cases} x_d = x_u + (x_u - x_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y_d = y_u + (y_u - y_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases},$$
(2)

式中 (x_a, y_a) 为畸变图像点坐标, (x_u, y_u) 为理想图像点坐标, (x_e, y_e) 为畸变中心, $k_1 \ k_2$ 为径向畸变系数,其中 r= $\sqrt{(x_u - x_e)^2 + (y_u - y_e)^2}$ 。 光学学报





Fig.3 Recognition of system image simulation. (a) Micro-optical label source bitmap of system; (b) simulated image of system when receiving distance is 124 mm; (c) information recognized by mobile decoding software;

(d) simulated image of system when receiving distance is 122 mm

在图像处理中,像点坐标通常用图像的像素坐标(m,n)表示,两者关系如下:

$$\begin{cases} x_{d} = (m - m_{0})d_{x} \\ y_{d} = (n - n_{0})d_{y} \end{cases},$$
(3)

式中(mo,no)为畸变中心对应的像素坐标,d、d,为坐标对应比例因子。

4.2 校正成像畸变

在环型超薄透镜与微型光学标签的组合系统中仿真发现,当接收距离小于 124 mm时,模拟成像发生桶 形畸变;当接收距离大于 124 mm时,模拟成像发生枕形畸变。为了方便分析畸变情况,记L₀=124 mm为设计 距离,ΔL=L-L₀为偏移距离,表示相对设计距离的偏移量,L为实际接收距离。为了能识别接收到的图像并正 确解码,必须对畸变进行修正。修正方法一般是在原模型关系中引入反映畸变影响的修正系数(即上一节所 述径向畸变系数),然后基于控制点或其他方法求解修正系数来对图像进行校正^[12-18]。采用基于 OpenCV 计 算机视觉库的 VC 6.0 平台开发了图像畸变校正的程序,充分利用 OpenCV 函数库功能,通过调整畸变系数实 现对图像的径向畸变的校正,获得理想的效果和准确度。图 4 为程序界面。

图 4(a)界面左侧为偏移距离-2 mm(实际接收距离 122 mm)时接收到的桶形畸变图像,经过调整畸变系数 k_1 至-0.19时,右侧校正后的图像基本已经没有畸变并且可以通过手机解码软件进行解码。图 4(b)界面左侧 为偏移距离 2 mm(实际接收距离 126 mm)时接收到的枕形畸变图像,经过调整畸变系数 k_1 、 k_2 分别为 0.21 和 0.1时,右侧校正后的图像基本已经没有畸变并且可以通过手机解码软件进行解码。用同样的方法校正相对 接收距离 0、±2、±4、±6、±8 mm 时的接收图像,得到的畸变系数如表 3 所示。根据表 3 的数据做出的径向畸变 系数 k_1 随偏移距离 ΔL 的变化关系如图 5 所示。

经过上述分析可以发现,畸变系数 k₁随着接收距离的增加而增加,且设计距离左右两边都近似线性增加。畸变系数 k₁>0时,表示图像发生枕形畸变;k₁<0时,表示图像发生桶形畸变。虽然该系统成像会产生一定的径向畸变,但通过数字图像处理可以对其进行修正,使得接收距离在一定范围内时可以正确识别接收到的微型标签码信息,这个范围大约为120~140 mm。

通过上述仿真可以发现,由于环型孔径超薄透镜次镜的中心遮拦,接收到的像中间区域光照强度很小, 当接收距离小于120mm时,光照强度较暗的区域逐渐增大,标签码的部分信息已经被遮挡,不能正确识别 信息;当接收距离大于140 mm时,系统的视场光阑已经不再是微型标签码,变为环型孔径超薄透镜,接收到的像不再完整,同样不能被正确识别。



图 4 图像校正程序界面。(a) 偏移距离为-2 mm时接收桶形畸变图像校正;(b) 偏移距离为 2 mm时接收枕形畸变图像校正 Fig.4 Program interface of image rectification. (a) Rectification of image barrel distortion when offset distance is -2 mm; (b) rectification of image pincushion distortion when offset distance is 2 mm

表3 不同偏移距离时图像的畸变系数

Offset distance ΔL /mm	Radial distortion coefficient k_1	Radial distortion coefficient k_2
-8	-0.34	0.13
-6	-0.31	0.11
-4	-0.26	0.05
-2	-0.19	0
0	0	0
2	0.21	0.1
4	0.25	-0.05
6	0.3	-0.11
8	0.35	-0.03
Radial distortion coeffici	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	īð /mm
	Offset distance ΔL /mm	
	图 5 畸变系数 k ₁ 随偏移距离ΔL的变化曲线	

Table 3 Image distortion coefficients of different offset distances



5 结 论

设计了一种大孔径、长焦距、超薄的环型折返透镜,将其用于手机作为微光学标签系统的接收端镜头, 实现了增大系统接收范围的目的。这样手机也能同样实现对微型标签码的远距离接收,为微光学标签在日 常生活工作中的推广应用提供了新的技术支持。接收图像光照强度不均匀的问题还有待进一步研究解决。

参考文献

- 1 Hu Xinguo. Barcode Technology and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 09. 胡新果. 条码技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 09.
- 2 Jiang Haoshi, Zhang Cheng, Lin Jiayu. RFID technology and its application and development [J]. Application of Electronic Technique, 2005, 5: 1-4.

蒋浩石,张 成,林嘉宇.无线射频识别技术及其应用和发展趋势[J].电子技术应用,2005,5:1-4.

- 3 Mohan Ankit, Woo Grace, Hiura Shinsaku, *et al.*. Bokode: imperceptible visual tags for camera based interaction from a distance[C]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 32-35.
- 4 Lin Wu, Liang Zhongcheng, Zhang Hao. Design of micro-optical label system of active encryption[J]. Internet of Things Technologies, 2012, 2(3): 25-28.

林 武,梁忠诚,张 浩.有源加密型微光学标签的设计与制作[J].物联网技术, 2012, 2(3): 25-28.

5 Zhang Hao, Liang Zhongcheng, Lin Wu. The design of micro visual optical tag system by passive light source[J]. Internet of Things Technologies, 2012, 2(4): 22-24.

张 浩,梁忠诚,林 武.无源微型可视化光学标签系统的设计[J].物联网技术, 2012, 2(4): 22-24.

6 Li Zhipeng, Liang Zhongcheng. Design and production of integrated micro-optics tag sys-tem[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 28(2): 5-8.

李志鹏,梁忠诚.集成化微光学标签系统的设计与制作[J].光电技术应用,2013,28(2):5-8

- 7 E J Tremblay, J Rutkowski, I Tamayo, *et al.*. Ultrathin folded imager[C]. OSA Topical Meeting on Computational Optical Sensing and Imaging (Optical Society of America, 2005).
- 8 E Tremblay, R Stack, R Morrison, et al.. Ultrathin four-reflection imager[J]. Appl Opt, 2009, 48(2): 343-354.
- 9 E J Tremblay, R A Stack, R L Morrison, et al.. Ultra-thin cameras using annular folded optics[J]. Appl Opt, 2007, 46(4): 463-471.
- 10 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Beijin: Science Press, 1994: 6-20. 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京:科学出版社, 1994: 6-20.
- 11 R Y Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3-D machine vision[C]. Proc IEEE Conf Comput. Vision Pattern Recognit, 1986.
- 12 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 13 Huang Junhui, Wang Zhao, Xue Qi, et al.. Calibration of camera with rational function lens distortion model[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508001.

黄军辉,王 昭,薛 琦,等.基于有理函数式镜头畸变模型的摄像机标定[J].中国激光,2014,41(5):0508001.

14 Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, *et al.*. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 32(12): 1222001.

张宝龙,李 丹,张少敬,等.非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J].光学学报,2014,32(12):1222001.

15 Ge Baozhen, Li Xiaojie, QiuShi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct liner transformation[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 488-494.

葛宝臻,李晓洁,邱 实.基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J].中国激光, 2010, 37(2): 488-494.

16 Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Shuguang, et al.. Model reference approaching method of camera distortion calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0715001.

徐 嵩,孙秀霞,刘树光,等.摄像机畸变标定的模型参考逼近方法[J].光学学报,2013,33(7):0715001.

17 Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Xi, *et al.*. Geometry method of camera self-calibration based on a rectangle[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (11): 1115002.

徐 嵩,孙秀霞,刘 希,等.基于矩形的摄像机自标定几何方法[J].光学学报. 2014, 34 (11): 1115002.

18 Zhou Qianfei, Liu Jinghong. Rapid nonlinear distortion correction of aerial optical zoom lens system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0411001.

周前飞,刘晶红.航空变焦距镜头非线性畸变快速校正方法[J].光学学报,2015,35(4):0411001.

栏目编辑: 韩 峰