

低成本高变焦光学变焦手机摄像镜头设计

王海燕¹ 苗华¹ 宋玉龙² 于远航¹ 黄芳¹

(¹ 长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 为了满足市场对低成本、高变焦比光学变焦手机摄像镜头的需求,采用三运动组份变焦核结构型式,选用优质光学塑料非球面透镜与普通光学玻璃球面透镜混合结构,利用计算机辅助设计软件 Zemax 优化镜头系统,设计了一种 4.6 倍光学变焦、500 万像素(5×10^6 pixel)的手机摄像镜头。系统全视场调制传递函数(MTF)值在空间频率 20 lp/mm 处大于 0.8,广角端及摄远端的 MTF 值在 1/2 奈奎斯特频率处大部分视场大于 0.4 lp/mm;相对畸变均小于 3.2%;全视场广角端处的相对照度大于 67%,摄远端处的相对照度大于 89%,并且变焦曲线平滑。该镜头系统具有分辨率高、制造成本低、变焦比高的优点。

关键词 光学系统设计;手机摄像镜头;光学变焦;光学塑料

中图分类号 TN942.21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.122202

Design of Low Cost and High Zoom Ratio Optical Zoom Camera for Mobile Phone

Wang Haiyan¹ Miao Hua¹ Song Yulong² Yu Yuanhang¹ Huang Fang¹

(¹ *Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*
² *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China*)

Abstract In order to meet the market demand of optical zoom camera for mobile phone with low cost and high zoom ratio, the zoom system with three movement groups and the optical plastic-glass composite structure are used to design a camera lens for mobile phone with 4.6 times optical zoom, and 5 megapixels (5×10^6 pixel) resolution. The zoom system is optimized with computer-aided design software Zemax. In the whole field of view (FOV), the modulation transfer functions (MTFs) at 20 lp/mm are higher than 0.8, and the MTFs at half Nyquist frequency of CMOS in most part of the FOV are greater than 0.4 lp/mm at the wide-angle end (short focus) and the telephoto end (long focus). The relative distortion is less than 3.2%. The relative illumination at the wide-angle end is greater than 67%, and it is higher than 89% at the telephoto end. The moving curves change smoothly. The camera system has the advantages of high resolution, low manufacturing cost, and high zoom ratio.

Key words optical system design; mobile phone camera; optical zoom; optical plastics

OCIS codes 220.3620; 120.4570; 080.3620

1 引言

随着摄像手机的普及,人们不仅追求高像素的优质手机摄像镜头,更渴望使其达到如同照相机镜头般的拍照效果,变焦镜头逐渐成为当今市场的需求。现今市场上的摄像手机变焦镜头大多数只是数码变焦,这种利用简单的图像插值处理手段产生的画质较差。因此,通过改变镜头焦距来得到优质照片的光学变焦手机摄像镜头便成为研发的亮点,将成为今后摄像手机发展的趋势。

收稿日期: 2011-07-07; **收到修改稿日期**: 2011-08-30; **网络出版日期**: 2011-10-30

作者简介: 王海燕(1986—),女,硕士研究生,主要从事光学设计及测试等方面的研究。E-mail: chuocanqi@126.com

导师简介: 苗华(1979—),女,博士,讲师,主要从事光学设计及目标探测与识别等方面的研究。

E-mail: ilev24@sina.com

低成本、高变焦比、高像素数的光学变焦手机摄像镜头是当今市场的发展趋势。文献显示,目前我国已研发出的具有最高变焦比的手机摄像镜头为 3 倍光学变焦、500 万像素(5×10^6 pixel)^[1],但是这种镜头利用了较多的玻璃非球面透镜,因玻璃非球面透镜的制造成本较高,所以该种手机摄像镜头的成本较高、市场占有率低。相对于玻璃非球面透镜制造成本高的缺陷,光学塑料非球面透镜具有制造成本低、便于加工、质量轻及适合于大量生产等优点^[2],应用塑料非球面透镜可大大降低手机摄像镜头的成本。现今我国采用光学塑料非球面透镜研发出的具有最高变焦比的手机摄像镜头为 2 倍光学变焦、500 万像素^[3]。在保证低成本的基础上,为了提高手机摄像镜头系统的变焦比,本文通过合理选择结构型式,采用玻璃-塑料混合光学系统^[4],设计了一种成本较低、分辨率高的 4.6 倍光学变焦 500 万像素手机摄像镜头,以满足市场需求。

2 镜头结构设计

设计的镜头系统采用四组元结构形式,其变焦核由三个相邻的运动组份组成,如图 1 所示。由三运动组份 Φ_2 、 Φ_3 和 Φ_4 的微小移动引起的整个运动组份像面移动分别为^[5]

$$m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2, \quad (1)$$

$$m_4^2 (1 - m_3^2) dq_3, \quad (2)$$

$$(1 - m_4^2) dq_4, \quad (3)$$

式中 m_2 、 m_3 、 m_4 分别为运动组份 Φ_2 、 Φ_3 和 Φ_4 的倍率;
 dq_2 、 dq_3 、 dq_4 分别为运动组份的微小移动。

这种变焦核的特点是三个运动组份各自独立移动,达到像面补偿^[5]:

$$(1 - m_2^2) m_3^2 m_4^2 dq_2 + (1 - m_3^2) m_4^2 dq_3 + (1 - m_4^2) dq_4 = 0, \quad (4)$$

各运动组份的微小移动与倍率变化关系为^[5]

$$\begin{cases} dq_2 = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \\ dq_3 = \frac{f'_3}{m_3^2} dm_3 + \frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2, \\ dq_4 = f'_4 dm_4 \end{cases} \quad (5)$$

由此得出该变焦系统的变焦方程为

$$\frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f'_3 dm_3 + \frac{1 - m_4^2}{m_4^2} f'_4 dm_4 = 0, \quad (6)$$

式中 f'_2 、 f'_3 、 f'_4 分别为运动组份 Φ_2 、 Φ_3 和 Φ_4 的焦距。由长焦处的初始参数 m_{21} 、 m_{31} 、 m_{41} ,根据上述公式(1)~(6)式便可求得为达到像面补偿,三运动组份移动量 dq_2 、 dq_3 、 dq_4 之间的关系,进而解得各组份的运动情况。

针对手机厚度小的限制因素,引用直角反射棱镜折叠空间光路,使镜头的运动组份沿手机的长度方向移动来改变其焦距,从而增大了运动组份的移动空间,有效地解决了镜头系统受手机厚度限制的问题,并且为驱动组件的安装也留下了充足的空间^[1]。

本文采用了由一个固定组份和三个运动组份组成的镜头系统,整个光学系统采用正-负-正-负结构型式。首先选择初始结构^[6],根据变焦方程(6)调整各运动组份之间的间隔,再利用计算机辅助设计软件 Zemax 优化光学系统结构,从而实现广视角与高变焦比。优化后结构图如图 2 所示,透镜 1~3 和直角棱镜构成第一固定组,其中透镜 1 与透镜 2 为双胶合透镜;透镜 4~6 构成第一运动组,其中透镜 5 与透镜 6 为双胶合透镜;透镜 7 为第二运动组,并且其前表面附近有一光阑;透镜 8~10 为第三运动组,其中透镜 8 与透镜 9 为双胶合透镜;透镜 4、透镜 7 和透镜 10 为非球面透镜;透镜 10 与像面之间置有一片红外滤光片,以减少红外光对图像传感器的噪声影响^[3],并且变焦移动过程中该滤波片的位置固定不变。优化后镜头系统在整个变焦移动过程中成像质量良好,运动组份运动曲线比较平缓;光学系统展开后的总长度为 34 mm,折叠后的宽度为 9 mm,满足了手机厚度的要求;在运动组份变焦移动过程中,光学系统的总长度固定不变,像面稳定,满足了设计要求。

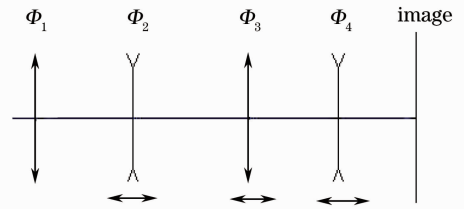


图 1 变焦核图

Fig. 1 Diagram of zoom system

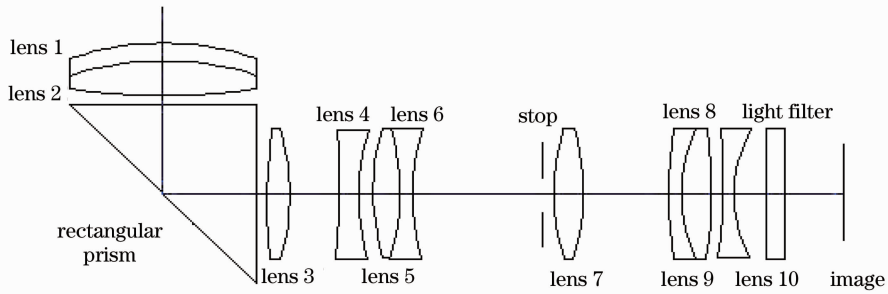


图 2 摄像镜头结构图

Fig. 2 Structural diagram of camera lens

3 镜头设计结果

3.1 材料选择及参数设计

应用塑料非球面透镜可大大降低手机摄像镜头的成本。但是光学塑料材料的选择较少,从而使光学设计的自由度大大减少,并且它的热膨胀系数较大、折射率随温度升高而减小(无机玻璃材料的折射率随温度升高而增加),因此,高质量的光学系统设计可以考虑无机玻璃与光学塑料材料的结合来实现。光学塑料与无机玻璃混合结构既可以大大降低制造成本、减轻重量、增大设计自由度,又可以避免温度对其焦点位移的影响^[2]。

为了研制出低成本、高像质、高变焦比、高像素数的手机摄像镜头,采用光学塑料与无机玻璃的混合结构,其中的非球面透镜均采用光学塑料材质,球面透镜均采用普通的无机玻璃材质,将光学塑料与无机玻璃的优点相结合,极大地降低了透镜系统的造价和复杂性。其中采用的光学塑料材质为聚苯乙烯和透明树脂。聚苯乙烯是一种无色透明、无毒无臭的热塑性塑料,其特点是熔融时的热稳定性和流动性好,所以易成型加工,成本低,适合大量生产,并且成型后收缩率小,成型产品稳定性好;透光率可达 90%,具有电绝缘性好、刚性好、抗冲击性强及耐腐蚀性好的优点;防水防潮性能极佳,防老化性能好,经久耐用,是制作非球面透镜的优质材料。透明树脂是一种无色透明的具有优异光学性质的新材料,透光率达 91%;具有刚性强、稳定性强、耐湿气性强、耐腐蚀性强的优点,并且加工成型性极佳、制造成本低;易回收利用,再次加工性质不会劣化,焚化时不会产生有毒气体,对环保相当有利,适合制造非球面透镜。本文设计的镜头系统广角端视场角为 56° , F 数为 $3.6\sim 4.4$,有效焦距为 $3.70\sim 16.98$ mm,匹配像素尺寸为 $1.75\ \mu\text{m}$ 的 500 万像素 CMOS 传感器^[3]。

3.2 像质评价

利用计算机辅助设计软件 Zemax 对镜头系统进行优化,下面是优化后得出的主要像质评价结果。

光学系统存在畸变会使像对物产生失真,一般手机摄像镜头的相对畸变要求控制在 5% 以内,本文设计的镜头系统在广角端处的相对畸变小于 3.2%,摄远端处的相对畸变小于 1.7%,符合设计要求。系统在广角端、中焦端、摄远端处的相对畸变如图 3 所示。

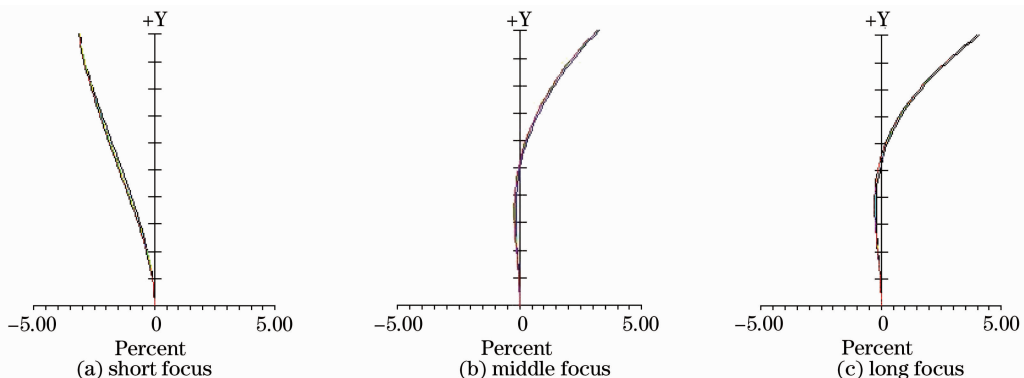


图 3 摄像镜头畸变

Fig. 3 Distortion of camera lens

调制传递函数(MTF)是光学系统成像质量的一个重要评价指标。MTF描述了物体调制度向图像调制度的转化,它是空间频率的函数^[7]。它反映了不同频率、不同对比度的传递能力,是评价镜头性能的综合指标。通常情况下,高频传递函数反映物体细节传递能力,中频传递函数反映物体层次传递能力,低频传递函数反映物体轮廓传递能力^[7]。由设计经验知,0.7视场以内是镜头成像的主要评价区域,决定了成像质量的优劣,其以外边缘视场对成像质量的影响较小。本文设计的镜头系统,各视场 MTF 值在空间频率20 lp/mm 处均大于 0.8,表明镜头分辨率极佳;中焦端的 MTF 值在 1/2 奈奎斯特频率处大于 0.5,广角端及摄远端的 MTF 值在 1/2 奈奎斯特频率处大部分视场大于 0.4 lp/mm;各视场 MTF 值在奈奎斯特频率处大于 0.1。图 4 所示为广角端和摄远端在 1/2 奈奎斯特频率处的 MTF。

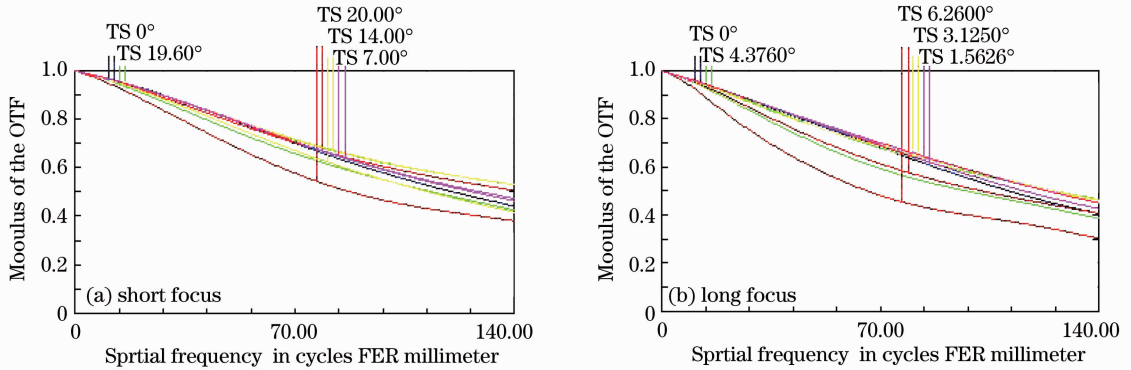


图 4 1/2 奈奎斯特频率处的调制传递函数

Fig. 4 Modulation transfer function at half Nyquist frequency

光学系统的相对照度随视场的增大而减小,边缘视场相对照度太低会使成像质量大幅下降,手机摄像镜头一般要求相对照度大于 60%。本文设计的镜头系统全视场在广角端处的相对照度大于 67%,摄远端相对照度大于 89%,满足了设计要求。广角端及摄远端的相对照度如图 5 所示。

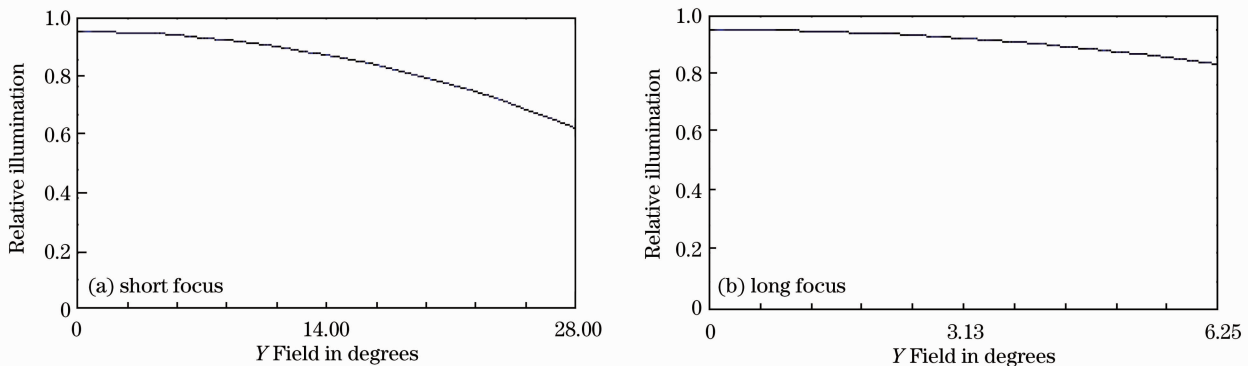


图 5 相对照度图

Fig. 5 Relative illumination

4 结 论

通过合理选择结构型式,采用光学塑料非球面透镜与无机玻璃球面透镜的混合结构,利用计算机辅助设计软件 Zemax 设计了一种 4.6 倍光学变焦的内置式手机摄像镜头,可匹配像素尺寸为 $1.75 \mu\text{m}$ 的 500 万像素 CMOS 传感器。系统全视场 MTF 值在空间频率 20 lp/mm 处大于 0.8,广角端及摄远端的 MTF 值在 1/2 奈奎斯特频率处大部分视场大于 0.4 lp/mm,相对畸变小于 3.2%,全视场在广角端处的相对照度大于 67%,摄远端相对照度大于 89%。该镜头系统具有分辨率高、制造成本低、高变焦比、性价比高、实用性强等优点。

参 考 文 献

- 1 Huang Cheng. Design of the Zoom Camera Lens within Cell Phone[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009

- 黄 城. 变焦距手机镜头的光学设计[D]. 镇江:江苏大学,2009
- 2 Zheng Wucheng, An Liansheng, Han Yajuan *et al.*. *Optical Plastic and Its Applications* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993
- 郑武城, 安连生, 韩娅娟 等. 光学塑料及其应用[M]. 北京:地质出版社,1993
- 3 Zhang Renjian, Feng Yaping, Jiang Man *et al.*. Compact optical zoom lens system for mobile phones[J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(1): 27~30
- 张韧剑, 冯亚萍, 江 曼 等. 结构简洁的光学变焦距手机镜头设计[J]. *应用光学*, 2011, **32**(1): 27~30
- 4 Shu Zhaolian, Tian Ailing, Hang Lingxia *et al.*. *Modern Optics Manufacturing Technology*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. 48~55
- 舒朝濂, 田爱玲, 杭凌侠 等. 现代光学制造技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010. 48~55
- 5 Tao Chunkan. *Design of Zoom Optical System*[M]. Beijing: National Defence Industry Press,1988. 22~39
- 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,1988. 22~39
- 6 Huang Cheng, Wen Tongqiang, Lu Jianhua *et al.*. Design of $2.5\times$ zoom camera lens within cell phone[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 47~52
- 黄 城, 温同强, 路建华 等. 2.5倍光学变焦内置式手机摄像镜头的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(5): 47~52
- 7 Huang Hangxing, Jin Weimin, Lu Ding. Thin aspheric lens for mobile phone[J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(3): 365~369
- 黄航星, 金伟民, 鲁 丁. 一款超薄非球面手机镜头设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(3): 365~369