

文章编号:1004-4213(2010)03-0455-5

机载护目镜型头盔显示器畸变校正^{*}

杨新军^{1,2,4}, 吴华夏¹, 余晓芬², 董戴¹, 王肇圻³

(1 安徽华东光电技术研究所, 安徽 芜湖 241002)

(2 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

(3 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

(4 廊坊师范学院, 河北 廊坊 065000)

摘要:根据机载飞行头盔特点及人机工程要求, 设计了护目镜型头盔显示器光学系统. 分析了该光学系统的光学性能和畸变特点, 研究了该光学系统畸变的算法软件校正方法, 设计了预畸变校正算法软件, 并对护目镜型头盔显示器光学系统进行了畸变校正. 结果显示: 校正后光学系统具有很高的成像质量, 空间频率为 50 lp/mm 时, 全视场调制传递函数接近 0.2; 同时畸变小于 0.5%, 系统满足机载护目镜型头盔显示器性能指标要求.

关键词:头盔显示器; 畸变校正; 护目镜; 预畸变; 光学系统

中图分类号: O435; R573

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0455

0 引言

头盔显示器(Helmet Mounted Display, HMD)的机载应用着重于两个方面: 一是作为空-空导弹及传感器的瞄准手段; 二是作为主显示器减轻飞行员在紧张剧烈战斗中的工作负担. 但是头盔显示器的设计必须与飞机座舱环境综合考虑, 原则上不能牺牲飞行员的操作简易性和舒适性来换取个别指标的改善; 同时头盔显示器还要考虑人的安全与人机工程.

采用飞行头盔护目镜作为组合玻璃的透视型头盔显示器, 具有最小化与飞行员视觉矛盾的光学结构; 同时实现了最大化周围物景的透视. 具体表现为:

1) 最大化 HMD 出瞳距离; 2) 提高了 HMD 调制传递函数; 3) 扩大了 HMD 的视场; 4) 实现了 HMD 无阻挡显示, 符合飞行员适应性.

但是采用飞行头盔护目镜作为组合玻璃的透视型头盔显示器, 光学系统不得不采用离轴设计, 从而带来了相应的设计复杂性、像差、色差和不良的结构稳定性, 其中最棘手的是离轴光学系统的复杂畸变校正问题.

本文分析了离轴光学系统畸变产生的原因和特

点, 研究了光学系统畸变的算法软件校正方法, 设计了预畸变校正算法软件, 并对护目镜型头盔显示器(Helmet Visor Display, HVD)光学系统进行了畸变校正, 得到了令人满意的结果.

1 HVD 光学系统设计

为满足机载护目镜型头盔显示/瞄准系统的需要, 本文首先对参考文献[1]中的透视型头盔显示器光学系统进行了优化: 1) 利用飞行头盔护目镜作为该光学系统的组合玻璃, 构成护目镜型头盔显示器; 2) 增加该光学系统的眼点距到 50 mm; 3) 调整该光学系统视场角为 $40^\circ(H) \times 30^\circ(V)$; 同时为了适应国内光学加工水平, 以及有利于光学系统装调, 通过双胶合透镜代替了该光学系统的折/衍混合透镜. 优化后的光学系统结构及与飞行头盔的装配效果如图 1 和图 2.

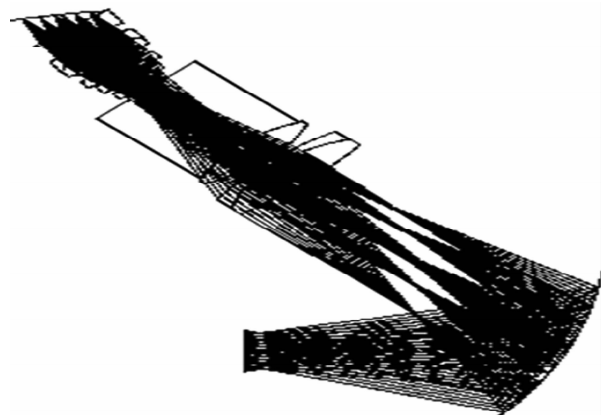


图 1 护目镜型头盔显示器光学系统
Fig. 1 Optical System of HVD

^{*} 安徽省科技攻关计划项目(06002008A)和总装备部航天医学工程研究所项目(H06059)资助

Tel: 0553-3022758

Email: yangxinjun@eyou.com

收稿日期: 2009-03-03

修回日期: 2009-05-11



图2 护目镜型头盔显示器安装位置
Fig. 2 Mounting position of HVD

图3为衍射效率100%的子午和弧矢方向的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线,可以看出,当空间频率为50 lp/mm时,全视场调制度接近0.2,满足800×600分辨率液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)图像源对光学系统的要求.但优化后的光学系统畸变如图4,矩形栅格代表光学系统的近轴像,扇形栅格代表光学系统的实际像.

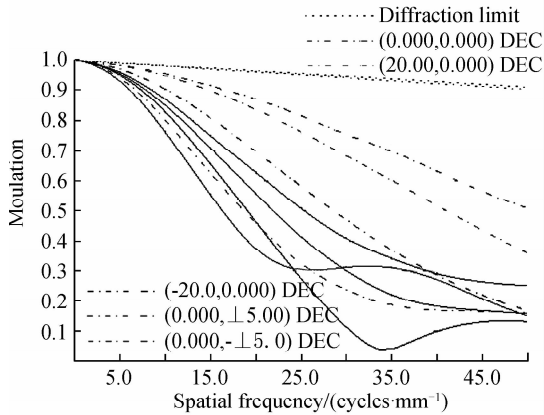


图3 HVD光学系统调制传递函数曲线
Fig. 3 MTF curve of HVD optical system

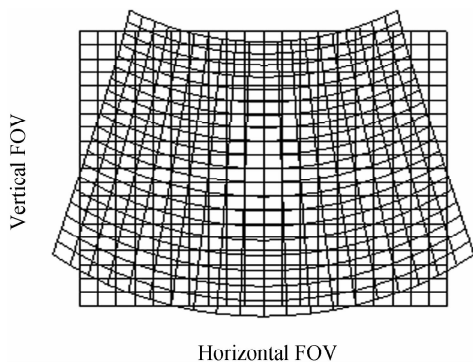


图4 HVD光学系统畸变
Fig. 4 Distortion of HVD optical system

通过CODEV光学软件计算,最大畸变超过了25%与参考文献[1]基本相同,而且研究发现单纯用光学校正的方法,无法实现消除畸变同时保持LCD对光学系统MTF的要求.另一方面,LCD是数字式像素型显示器,不同于阴极射线管(Cathode-Ray Tube, CRT)等模拟型显示器. CRT可以确定成像光束在显示区域中任意一点的位置,而像素型显示器仅能确定像素在给定矩阵中存在的位置,这就限

制了用图像源补偿光学系统产生的光学畸变的能力.经过分析研究,在机载头盔显示器显示控制电路中增加了实时影像变形模块,该模块是以“奔腾”芯片为基础的处理单元,由其对来自传感器的视频信号进行预畸变处理,再驱动LCD显示,预畸变的图像可以抵消光学系统产生的光学畸变,实现畸变校正.

但是要想通过预畸变方法实现光学系统的最佳畸变校正,首先要知道光学系统畸变的特点.利用参考文献[2]的矢量像差理论,对优化后的护目镜型头盔显示器光学系统畸变进行分析发现,由于护目镜倾斜和偏心,导致相对于轴外光线来说,反射面是非对称的,由此产生了共轴光学系统不存在的复杂畸变.从图4可以看出,光学系统存在明显的弓形畸变和梯形畸变.

2 HVD光学系统畸变校正

2.1 光学系统畸变像差校正数学建模

在机器视觉、计算机图形学和摄影测量学等相关研究中有许多关于畸变校正的数学模型,这些数学模型仅考虑完全径向畸变,即关于一个中心点旋转对称的畸变形式.但从图4可以看出,HVD光学系统的畸变是一种复杂畸变,除了少量的传统径向畸变以外,还有传统光学系统不存在的弓形畸变和梯形畸变.因此本文研究的焦点将是构建针对特定光学系统,包含非径向畸变成分的畸变校正函数模型.通过对文献[3-9]中的方法进行分析 and 比较,确定采用Ruprecht等提出的离散数据插值技术^[9],同时融合基于径向基函数的映射方法.

针对护目镜型头盔显示器光学系统,图5给出了输入栅格的近轴像和实际像的对应关系.

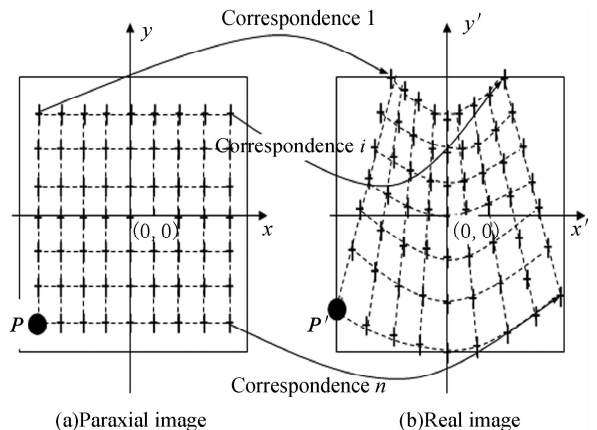


图5 HVD光学系统的近轴像与实际像对应关系
Fig. 5 Correspondence of paraxial image and real image of HVD optical system

从图中可以看出,近轴成像区域和实际成像区域的坐标系原点定位于光学系统轴向视场主光线与

像面的交点. 设 $\mathbf{P} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 代表近轴像点坐标, $\mathbf{P}' \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$ 代表对应的实际像点坐标. 这种对应关系可表示为函数 f

$$f: \mathbf{p} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \mapsto f(\mathbf{p}) = \mathbf{p}' \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (1)$$

当采用离散数据插值技术确定式(1)的函数关系时, 图 5 中 N 对近轴像点和实际像点对应关系即为插值的约束条件; 同时函数关系可表示为径向基函数的线性组合. 若设 N 个插值点的坐标为 $\mathbf{p}_{\text{basis_center}_i}$, 其中 i 从 1 到 N 变化, 则式(1)可由式(2)表示

$$f(\mathbf{p}) = \mathbf{p}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N \alpha_i R(\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{basis_center}_i}\|) + O_m(\mathbf{p}) \quad (2)$$

式中: R 为径向基函数;

$\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\text{basis_center}_i}\|$ 为第 i 个插值中心到 的距

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(\|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_1\|)^2 + r_1^2} & \cdots & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_N\|)^2 + r_N^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_1\|)^2 + r_1^2} & \cdots & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_N\|)^2 + r_N^2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_1\|)^2 + r_1^2} & \cdots & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_N\|)^2 + r_N^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_1\|)^2 + r_1^2} & \cdots & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_N\|)^2 + r_N^2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{(\|\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_1\|)^2 + r_1^2} & \cdots & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_N\|)^2 + r_N^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_1\|)^2 + r_1^2} & \cdots & \frac{1}{(\|\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_N\|)^2 + r_N^2} \end{bmatrix}$$

利用式(5)可以确定径向基函数的权重 α , 式中 $\mathbf{p}'_{\text{data}}$ 和 \mathbf{p}_{data} 分别为图 4 中扇形栅格(实际像)数据和矩形栅格(近轴像)数据. 这些数据是护目镜型头盔显示器光学系统通过 CodeV 光学设计软件的畸变栅格数据(Distortion Grid)选项^[13]给出.

2.2 预畸变校正软件设计

预畸变校正软件由两个模块构成: 一是象素预畸变校正模块(PixPrewarp. c); 二是图像灰度校正模块(TransfImage. c). 象素预畸变校正模块完成预畸变校正的第一步, 计算输入象素的期望位置; 图像灰度校正模块完成预畸变校正的第二步, 补偿输出图像的空洞和锯齿等缺陷. 预畸变校正软件的结构和流程为:

第一步:

离; α_i 为径向基函数的权重; $O_m(\mathbf{p})$ 为 m 阶多项式.

一般而言, $(\mathbf{p}_{\text{basis_center}_i})_{i=1 \dots N} = (\mathbf{p}_i)_{i=1 \dots N}$. 通过对基于径向基函数的映射方法^[10-12]在实际应用中的分析研究, 设径向基函数为

$$R(d) = (d^2 + r^2)^{\mu/2} \quad (3)$$

式中: $d = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\|$; $r_i = \min_{k \neq i} \|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_i\|$. 当 μ 取经验值 -2 可满足大部分畸变校正的精度要求. 于是, 式(2)可转化为

$$f(\mathbf{p}) = \mathbf{p}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{1}{(\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\|)^2 + r_i^2} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

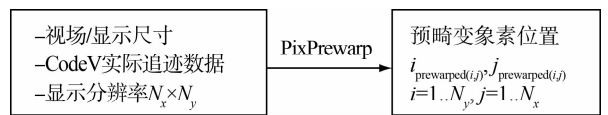
进一步式(4)可以简化表示为

$$\mathbf{p}'_{\text{data}} = \mathbf{p}_{\text{data}} = \mathbf{M}\alpha \quad (5)$$

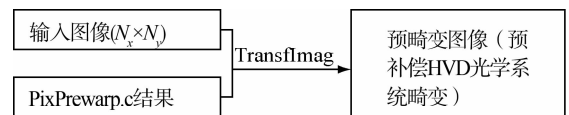
式中:

$$\mathbf{p}'_{\text{data}} = [x'_1 \quad y'_1 \quad x'_2 \quad y'_2 \quad \cdots \quad x'_n \quad y'_n]^T$$

$$\mathbf{p}_{\text{data}} = [x_1 \quad y_1 \quad x_2 \quad y_2 \quad \cdots \quad x_n \quad y_n]^T$$



第二步:



2.3 校正效果

对于护目镜型头盔显示器光学系统, 利用 CodeV 畸变栅格数据(Distortion Grid)选项^[13], 得到输入栅格的近轴像和实际像, 如图 4. 然后把近轴栅格像通过预畸变校正软件处理后, 得到一个预畸变栅格图像, 再与光学系统生成的实际栅格像进行比较, 即可确定预畸变效果, 如图 6.

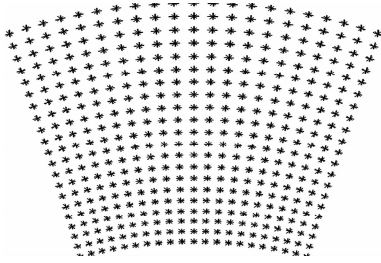


图6 HVD光学系统成像和预畸变图像比较
Fig. 6 Comparison of prewarped image and final image of HVD optical system

图中符号“×”构成的栅格为护目镜型头盔显示器光学系统生成的实际栅格像,符号“+”构成的栅格为预畸变图像.最大相对误差可由图中相对应的两个相差最大的点的差值计算出来,表达式为

$$E_{\max} = \left(\frac{\|r_{\text{model}} - r_{\text{real}}\|}{r_{\text{real}}} \right) \cong 0.5\% \quad (6)$$

为了对护目镜型头盔显示器光学系统预畸变校正效果有一个直观感受,利用 CodeV 光学软件设计了护目镜型头盔显示器光学系统的逆光学系统.由于头盔显示器光学系统为目视光学系统,设计时光线追迹是从眼位到图像源,而逆光学系统光线追迹方向与原光学系统的光线追迹方向正好相反,所以逆光学系统的输出结果体现的是观察者所看到的实际效果.同时由光的可逆性,逆光学系统畸变与原光学系统畸变正好相反,因此如果逆光学系统输入为预畸变图像,那么就可以和逆光学系统的光学畸变相互抵消,观察者所看到的就是无畸变的图像.

通过 CodeV 二维图像仿真选项^[13]可以实现所述过程的仿真,感受预畸变软件的畸变校正效果.在 CodeV 二维图像仿真环境中,将图 7 所示美军标准鉴别率板的预畸变图像,如图 8,作为逆光学系统的

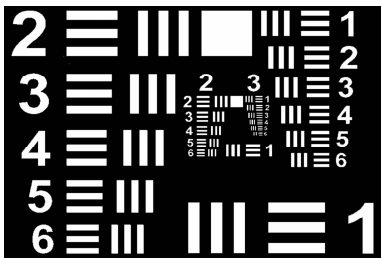


图7 美军标准鉴别率板
Fig. 7 Standard 1951 U.S. air force target

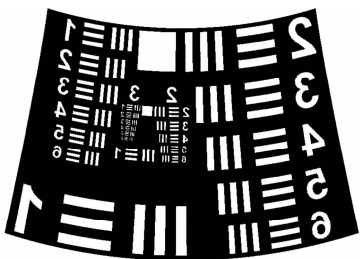


图8 美军标准鉴别率板镜像预畸变图像
Fig. 8 Mirror prewarped image of the 1951 standard U.S. air force target

输入图像.考虑到 CodeV 二维图像仿真对输入图像存在镜像作用,为了保障观察者所看到的图像与实际图像相一致,图 8 中的图像是镜像预畸变图像.图 9 为图 8 镜像预畸变图像通过逆光学系统所成的像.

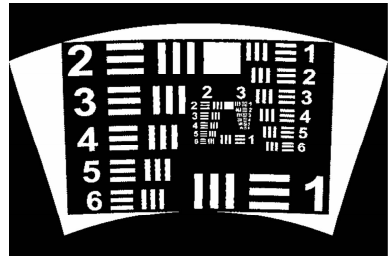


图9 逆光学系统输入镜像预畸变鉴别率板时,人眼所看到的图像
Fig. 9 Output image of the reverse lens which is input the mirror prewarped image of the standard 1951 U.S. air force target

从图 7 和图 9 的比较可以看出,预畸变方法有效地校正了护目镜型头盔显示器光学系统的畸变.

3 结论

由于机载护目镜型头盔显示器光学系统的离轴结构特性,使飞行员通过头盔显示器所见画面存在复杂的失真现象,这不仅影响飞行员观察飞行参数,更关键的是影响飞行员判断瞄准精度.本文研究了利用软件预畸变方法校正光学系统畸变的问题,通过分析护目镜型头盔显示器光学系统的畸变特点,提出将 Ruprecht 等的离散数据插值技术,融合基于径向基函数的映射方法构建预畸变函数的方法.通过将预畸变图像与实际畸变图像比较,计算发现,相对误差不大于 0.5%;同时利用 CodeV 光学软件设计了护目镜型头盔显示器光学系统的逆光学系统,通过 CodeV 二维图像仿真选项,以美军鉴别率板实物为例,给出了实际校正效果,结果令人非常满意.

参考文献

- [1] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang, *et al.* Hybrid diffractive-refractive 60°-diag. field of view optical see-through head-mounted display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **36**(1): 89-92.
- [2] THOMPSON K P. Aberration fields in tilted and decentered optical system[D]. Tucson: University of Arizona, 1980.
- [3] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J Robotics Automat*, 1987, **3**(4): 323-344.
- [4] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1992, **14**(10): 965-980.
- [5] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [6] ZHANG Z. Camera calibration with one-dimensional objects

- [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2004, **26**(7): 892-899.
- [7] MA L, CHEN Y Q, MOORE K L. Flexible camera calibration using a new analytical radial undistortion formula with application to mobile robot localization [C]. *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Houston, USA, October 2003.
- [8] WANG Jian-hua, SHI Fan-huai, ZHANG Jing, *et al.* A new calibration model of camera lens distortion [J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(2): 607-615.
- [9] PUPRECHT D, MÜLLER H. Image warping with scattered data interpolation methods [D]. Dortmund: University of Dortmund, 1992.
- [10] CHEN Rong-hua. Quasi-interpolation with radial basis function and application to solve partial differential equations [D]. Shanghai: Fudan University, 2005.
陈荣华. 径向基函数拟插值理论及其在微分方程数值解中的应用[D]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [11] LI Cui-hua, ZHENG Nan-ning. Theory of constructing radial basis functions and its application image processing [J]. *Journal on Numerical Methods and Computer Applications*, 2000, **21**(2): 81-87.
李翠华, 郑南宁. 构造径向基函数的一般方法及其在图像处理中的应用[J]. 数值计算与计算机应用, 2000, **21**(2): 81-87.
- [12] GAO Xue-jun, ZHU Yi-ding. Local radial point interpolation method based on compactly supported radial basis functions [J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry (Natural Science)*, 2007, **15**(3): 86-90.
高学军, 朱一丁. 基于紧支径向基函数的局部径向点插值方法. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2007, **15**(3): 86-90.
- [13] Optical Research Associates. Code V reference manual, Version 9. 8[EB/OL]. <http://www.opticalres.com>.

Distortion Correction for Optical System of Helmet Visor Display

YANG Xin-jun^{1,2,4}, WU Hua-xia¹, YU Xiao-fen², DONG Dai¹, WANG Zhao-qi³

(1 *Anhui Huadong Photoelectric Technology Institute, Wuhu, Anhui 241002, China*)

(2 *School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

(3 *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

(4 *Langfang Normal University, Langfang, Hebei 065000, China*)

Abstract: An optical system for airborne Helmet Visor Display (HVD) is designed according to characteristics of the airborne helmet and requirements of man-machine engineering. The optical performance and distortion model are analyzed, and the distortion correction algorithm and software are presented to reduce the distortion of the designed optical system. Experimental results show that after correcting the distortion for the designed optical system, a high imaging quality is achieved, the MTF approaches 0.2 at the spatial frequency of 50lp/mm, and the full field of view distortion is less than 0.5%. The results meet the demands of airborne Helmet Visor Display(HVD).

Key words: Helmet-mounted display(HMD); Distortion correction; Visor; Prewarp; Optical System

YANG Xin-jun was born in 1969. He received his Ph. D. degree from Nankai University in 2005. At present, he is a postdoctoral candidate at Anhui Huadong Photoelectric Technology Institute, and his research interests focus on optical design, binary optics and helmet-mounted display system.

