

文章编号 1004-924X(2015)增-0731-08

基于星敏感器的高精度星图模拟系统

卢岩^{1,2}, 高昆^{1,2*}, 庄幽文^{1,2}, 刘洪森^{1,2}, 许廷发^{1,2}

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 设计了对星敏感器进行地面性能测试的星图模拟系统。根据技术指标, 讨论了星图模拟的基本原理并确定了系统总体方案。建立了星图模拟方法流程, 阐述了辅助视场标定、星等与亮度转换、坐标转换以及星图显示的基本原理和实现方法。针对传统的星等与亮度转换存在的问题, 提出了线性亮度矫正和基于量测数据的非线性亮度矫正方法; 针对光学系统畸变引起的星点位置偏差, 建立了相应的模型, 提出了光学畸变矫正方法。最后进行了静态与动态星图模拟, 并设计了缩略图和外接显示器实现了同步双屏显示。采用 FK5 星表进行了实验仿真, 结果表明, 提出的系统能够准确模拟 $10.5^\circ \times 7.5^\circ$ 视场内 $-4.6 \sim 6$ 等星, 星点位置畸变误差保持在 0.017% 以内。

关键词: 星敏感器; 星图模拟; 畸变校正; 星等; 坐标转换

中图分类号: V448.222 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0731

Simulation system of high accuracy star images based on star sensor

LU Yan^{1,2}, GAO Kun^{1,2*}, ZHUANG You-wen^{1,2}, LIU Hong-miao^{1,2}, XU Ting-fa^{1,2}

(1. School of Optics and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of the Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: gaokun@bit.edu.cn

Abstract: A star image simulation system was designed to test the performance of a star sensor on the ground for satisfying the requirement of accuracy and reliability of the start simulation. According to technical index, the fundamentals of star simulation were discussed, and then the system overall scheme was determined. The process of star map simulation method was established, and the fundamentals and implementation method of auxiliary field calibration, converting the magnitude into grayscale, coordinate transforming and star map display were described in details. The linear brightness correction and the nonlinear correction method based on measurement data were proposed to solve the problems that exist in the traditional conversion between magnitude and gray. The corresponding model was established and then was put forward the distortion correction method to solve the star positional deviation caused by distortion of the optical system. Finally, the star simulation was implemented with static and dynamic displays, and a double-screen was used to synchronize display by the

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61340018, No. 61271427); 北京市自然科学基金资助项目 (No. 4152045)

thumbnail and an external monitor. The FK5 star catalogue was used in experiment, and the simulating results indicate that the system implements the simulation on the field of view of $10.5^{\circ} \times 7.5^{\circ}$ and star magnitude of $-4.6 \sim 6$ accurately, meanwhile the star location distortion error keeps within 0.017%.

Key words: star sensor; star image simulation; distortion correction; magnitude; coordinate transformation

1 引 言

星敏感器是一种具有高精度和高可靠性的光学敏感器,广泛应用于飞行器的姿态定位、天文导航、导弹等精准打击装备的远程制导和控制,以及轮船、舰艇的精确测量^[1-2]。研制星敏感器时,需要设备针对实际星空进行全面的软、硬件仿真测试,以达到精确的测试指标。

由于航天实验费用巨大,星敏感器的仿真测试常依靠星模拟器进行。星模拟器是一种在地面上模拟星空背景,对星敏感器的各项性能指标进行检测的设备,目前已经具有可以模拟大视场、宽光谱、多星等的静态、动态星模拟器^[3]。星模拟器的测试精度不仅依赖于测试系统的光学设计水平,同时也依赖于星图模拟的计算方法。星图模拟和显示是星模拟器的核心功能部件,主要用于实现对星空的实时模拟,故要求具有较高的精度和准确度^[4]。所以星图模拟系统对星敏感器的研制以及星模拟器的仿真测试具有重要意义。

本文从星图模拟的基本原理出发,阐述了星图模拟系统的设计流程和功能结构,重点研究了系统观测视场的确定、背景星空和星体亮度的模拟、星体坐标位置的转换,并针对星体的显示亮度进行了线性和非线性矫正。同时,通过分析光学畸变的产生原因及其对星体坐标位置的影响,提出了光学畸变矫正方法。最后,系统生成了所需模拟星图,设计了静态显示和动态模拟。为了方便观测,通过外接显示器扩展了星图窗口,实现了双屏同步显示,为进一步针对星敏感器进行地面标定和测试提供了条件。

2 基本原理与系统组成

要对星敏感器进行功能和性能检测,需要搭载仿真计算机、星图模拟系统以及准直光学系统

等。其中星图模拟系统是本文的研究重点,星图模拟的过程是根据星敏感器的姿态参数得到飞行器光轴指向,通过查询基本星表检索出当前视场范围内的恒星信息,利用星等信息进行亮度转换实现星点灰度模拟,利用赤经、赤纬信息进行坐标转换实现星点位置模拟。

本文设计的星图模拟系统组成如图 1 所示,主要功能分为:光轴与视场确定、根据星表文件产生星图、亮度和位置矫正、星图显示以及其他辅助功能。其中星图的产生需要查询并检索星表数据库,在显示星点后同步显示当前视场范围内星点的星等、坐标等信息,同时可进行不同的误差畸变矫正。在显示时,可以在静态星图显示、动态显示以及缩略图和扩展 VGA 双屏显示间切换。系统添加当前测试记录功能使得在实际使用中可以记

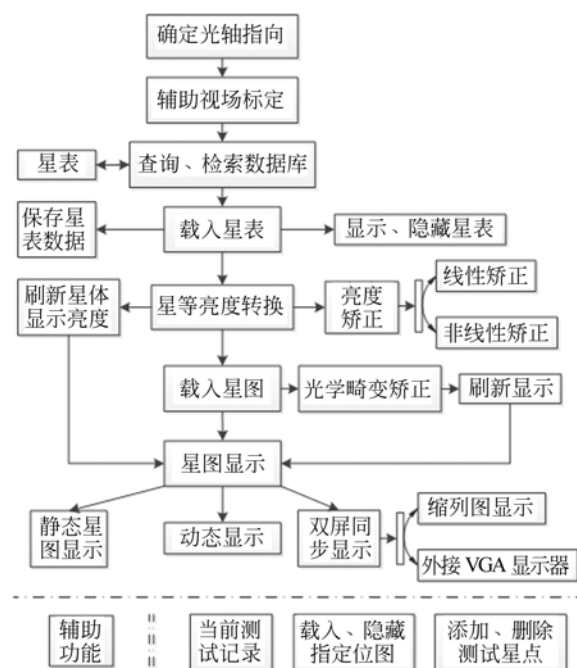


图 1 星图模拟系统组成

Fig. 1 Constitution of simulation display system for star map

录当前星图并在下次观察该星图时同步显示测试记录。为进行对比测试,系统可以加载显示指定的星图文件,同时,可以人工添加和删除测试星点。

3 辅助视场标定

星敏感器对星空进行拍摄时,其视场范围对地心的张角有限,星敏感器视轴在移动过程中,可认为赤纬均匀变化,但赤经变化与视场大小相关^[5]。所以当加载星图时,需要先确定视场大小。本文设计在显示区域的四角附近进行标记,通过经纬仪或星敏感器进行视场标定,由于边缘视场测试误差较大,所以设置十字测试区域。

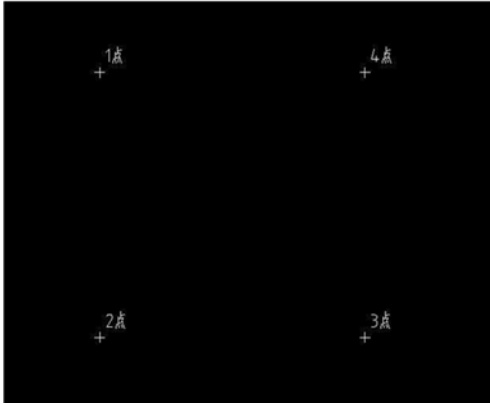


图 2 视场标定示意图

Fig. 2 Sketch of field calibrating

如图 2 所示,设显示区域大小为 $N_x \times N_y$, 十字标记距离水平/垂直边缘分别为 $(\Delta x, \Delta y)$, 以横向视场为例,测试得出标记范围内的横向视场为 ΔFOV_x , 则两个像素间的角度为:

$$FOV_{pix} = \frac{\Delta FOV_x}{N_x - 2\Delta x}, \quad (1)$$

整个视场横向角度为:

$$FOV_x = (N_x - 1) \times FOV_{pix}. \quad (2)$$

4 星等模拟

4.1 恒星星等模拟

由于图像的灰星等模拟就是在计算机屏幕上用不同灰度值模拟星点亮度的过程。星等值越小,亮度越强,对应的灰度值越高。由于 M 等星

的亮度是 $(M-1)$ 等星亮度的 2.512 倍,且显示灰度 g 的范围为 $0 \sim 255$,假设 k 等星为最小星等,其对应的灰度为 255,则星等与屏幕显示灰度级存在以下关系:

$$g = \frac{255}{2.512^{(M-k)}}. \quad (3)$$

金星最亮时为 -4.6 等星,肉眼一般可观测到的最暗星为 6 等星,因此本文设置星等范围为 $-4.6 \sim 6$ 。

4.2 星等亮度矫正

公式(3)是理想情况下的灰度与星等的对应关系,实际应用中,成像亮度还受曝光时间影响,真实星空存在的杂散光、辐射和小行星以及星敏感器自身的误差都会对亮度有影响。文献[6]对公式(3)添加了参数作修正^[6],但实际应用中参数的设置存在不确定性。本文针对实际应用提出两种亮度矫正方法。

4.2.1 线性矫正

线性矫正主要为了方便人眼观察,因为实际观测中,暗星数量众多,甚至在视场范围内的星都集中在 $4 \sim 6$ 等星或者更暗,人眼很难辨别。采用线性变换就是根据星等值越小亮度越强的原则,让亮度均匀分布在一个设定的灰度级范围内。矫正公式为:

$$g = k(M_{\max} - M_{\min}) + g_0. \quad (4)$$

实际中,需要人工输入一对星等与其对应的亮度 (M_1, g_1) 、 (M_2, g_2) ,带入式(4),则 k 和 g_0 的值为:

$$\begin{cases} k = \frac{g_2 - g_1}{M_2 - M_1}, & (M_2 \neq M_1) \\ g_0 = g_1 - \frac{g_2 - g_1}{M_2 - M_1}(M_1 - M_{\min}), & (M_2 \neq M_1) \end{cases}. \quad (5)$$

本文设置 M_{\min} 为 -4.6 。

4.2.2 非线性矫正

传统的亮度矫正方法是建立在星等对应的灰度级的基础上,但实际中显示系统所显示的星点亮度存在误差,由于误差的存在,会出现灰度级 g 的亮度高于灰度级略大于 g 亮度的情况。同时,对于确定的灰度级,不同的显示系统显示出的亮度也会出现差别。

本文提出的非线性亮度矫正建立在实验测试数据的基础上。针对每一个灰度级测试出其对应

的照度,再换算成星等,即建立特定显示系统的显示灰度级与星等之间的一一对应关系,将星等值中最接近的值所对应的灰度作为其星点显示亮度,从而更准确地确定星等 M 所对应的灰度。

本系统为测出所有灰度级对应的照度,将测试电流设定为 5 mA,部分测试数据如下:

表 1 灰度与星等对照测量数据

Tab. 1 Measurement data between gray and corresponding magnitude

灰度级	照度值/lx	单像素照度/lx	星等值
13	0.02	1.360 54E-08	5.723833033
37	0.03	2.040 82E-08	5.283604885
47	0.04	2.721 09E-08	4.971258043
93	0.09	6.122 45E-08	4.090801748
120	0.15	1.020 41E-07	3.536179874
150	0.31	2.108 84E-07	2.748003787

5 星图的建立

5.1 坐标系转换

恒星位置的表达是在天球坐标系下进行的,星敏感器接收到的星图一般要求成像在 CCD 平面上,因此需要进行坐标系变换,坐标变换包括平移和旋转变换^[7-8]。根据文献[8]的估算,对恒星进行观测时,坐标中心在地心和卫星之间由平移导致的星间角距 α 约为:

$$\alpha \approx \frac{\text{卫星与地心间距}}{\text{恒星与太阳间距}} \approx 0.000\ 192\ 5''$$

因此,对于恒星方位角,可忽略坐标平移误差。根据坐标转换原理,将天球坐标系按照 313 旋转方式,再对坐标系单位向量做归一化处理,即可得到恒星的赤经赤纬 (δ, ξ) 与映射到 CCD 平面的点坐标 (X, Y) 的转换公式:

$$\begin{cases} X = \left(\frac{\cos \xi \sin(\delta - \delta_0)}{\sin \xi \sin \xi_0 + \cos \xi \cos \xi_0 \cos(\delta - \delta_0)} \right) \times \frac{L_{\text{row}}}{2 \times \tan(\text{FOV}_x/2)} \\ Y = \left(\frac{\sin \xi \cos \xi_0 - \cos \xi \sin \xi_0 \cos(\delta - \delta_0)}{\sin \xi \sin \xi_0 + \cos \xi \cos \xi_0 \cos(\delta - \delta_0)} \right) \times \frac{L_{\text{col}}}{2 \times \tan(\text{FOV}_y/2)} \end{cases}, \quad (6)$$

其中:设 $L_{\text{row}}, L_{\text{col}}$ 分别为行/列像素数,CCD 平面的中心坐标为 $(-\frac{L_{\text{row}}}{2}, \frac{L_{\text{col}}}{2})$, $\text{FOV}_x, \text{FOV}_y$ 分别为 x, y 方向视场角, (δ_0, ξ_0) 为光轴指向。

5.2 光学畸变矫正

光学畸变的主要来源包括光学系统设计误差引起的星点像产生的畸变、空间坐标转换到平面坐标时产生的误差以及星表文件制定时的误差等,从而导致星点的像元位置产生偏差。光学系统畸变的存在使得主光线与高斯像面交点的高度与理想像高之间存在差别,在星模拟器上就表现为点像的实际像高与理想像高存在误差,一般要求相对畸变不超过千分之一。同时,由于光学系统的场曲,也会使得光学系统的出射光存在发散或聚合现象^[9]。

本文提出的光学畸变矫正是建立在实际测量基础上的,通过对比求出误差并进行修正。畸变矫正原理示意图如图 3 所示。

图中, O 点为显示器中心基准点,以 O 点为圆心画同心圆,圆环间距为误差带,即误差带范围内的畸变值在允许的范围内。由实验测得的单个

圆环上任意点的误差的差值极小,即可认为圆环上的畸变量相同。 $O_1 \sim O_n$ 为由公式(6)计算出的垂直方向的圆环交点,其对应圆环上的畸变值通过测量得到,矫正后的对应基准点坐标位置为 $O'_1 \sim O'_n$ 。如图 3,假设 B 点经矫正后的位置为 B' 点,则光学畸变矫正步骤如下:

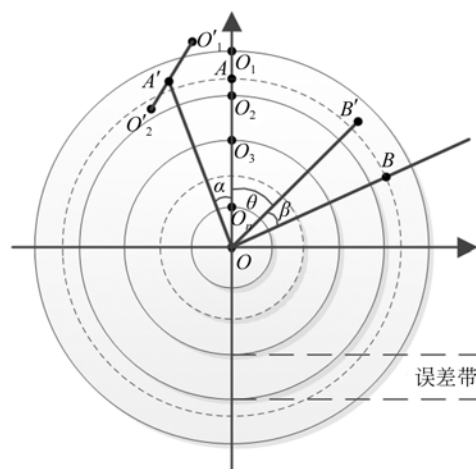


图 3 畸变矫正原理图

Fig. 3 Schematic of distortion correction

第一步,设图 3 中 A、A'、B、B' 点的坐标分别为 (x_A, y_A) 、 $(x_{A'}, y_{A'})$ 、 (x_B, y_B) 、 $(x_{B'}, y_{B'})$, 其中, A 点是 B 点在圆环垂直方向上的映射, 即 $|\mathbf{OA}| = |\mathbf{OB}|$, 根据坐标转换公式(6)计算出 B 点坐标, 同理, 可计算出 A 点坐标。设 A 经过旋转矩阵 \mathbf{M} 得到 B, 则可得 \mathbf{M} 为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (\delta = \beta + \theta), \quad (7)$$

第二步, 由矫正后的基准坐标 O'_1 、 O'_2 , 再根据 A 点在 $O_1 O_2$ 的线性比例计算出 A 点在 $O'_1 O'_2$ 上等比例映射的 A' 点的坐标。由于 $\alpha = \beta$, 因此 A' 到 B' 的旋转矩阵为 \mathbf{M} 。即:

$$\begin{bmatrix} x_{A'} & y_{A'} \end{bmatrix} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_{B'} & y_{B'} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

第三步, 将式(7)带入式(8), 即可得到 B 点经过畸变矫正后的 B' 点的坐标。

6 星图模拟仿真与分析

6.1 星图显示

星图模拟的目的是针对天文测量进行地面仿真。本系统将光轴设置为显示中心, 视场大小与显示区域对应, 根据 FK5 星表数据^[10] 计算出视场范围内星点在星传感器坐标系下对应的平面坐标, 将星等转换为屏幕显示灰度。显示部分分为缩略图显示以及外接显示器显示。



图 4 局部模拟星图

Fig. 4 Local simulated star image

设置光轴指向的赤经赤纬为 $10.5^\circ \times 7.5^\circ$, 根据表 2 以及公式(2)得到视场大小为: $10.01^\circ \times 7.50^\circ$, 其中单星张角为 $26''$, 满足一般星模拟器单星张角为 $20'' \sim 40''$ 的技术指标^[11]。为方便观测, 将星等亮度调亮后, 模拟生成的局部星图如图

4 所示。缩略区域分辨率为 $400 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ 。

表 2 视场标定测量数据

Tab. 2 Measurement data by calibrating field of view (°)

测试点	方位角均值	俯仰角均值
1 点	138.786 17	85.658 81
2 点	138.522 28	92.878 45
3 点	148.257 24	93.241 35
4 点	148.529 3	86.023 48

图 5 对比了不同星等的亮度显示, 从 -4 到 6 星等, 间隔 1 星等显示一个星点。



图 5 不同星等亮度对比

Fig. 5 Comparison of brightness for different magnitudes

卫星在实际运行时, 星敏感器接收到的星图随时间而变化, 因此需要设计动态星图模拟^[12-13]。文献[13]分析了卫星飞行与赤经赤纬的变化规律, 本文也遵循赤经 $0^\circ \rightarrow 360^\circ \rightarrow 0^\circ$ 以及赤纬 $0^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 0^\circ$ 的变化关系。

6.2 仿真与分析

图 6 为系统软件界面, 其中, 星点以单像素表示, 通过不同的设置, 可以对显示进行调节, 当外接显示设备时, 软件能够自动识别其分辨率, 并将星图缩略图区域同步显示在外接显示器上。

图 7 为星图亮度矫正对比图, 其中图(a)为经过公式(3)变换后的显示, 由于星等集中在 6 等星附近, 所以不便于观测。图(b)和图(c)分别为线性变换后的显示, 图(d)为根据表 1 的测量数据进行非线性矫正后的显示。

从显示结果看, 不同情况下的显示灰度存在一定差异, 因此有必要进行亮度矫正。图 8 为星点位置进行畸变矫正前后的对比图。

由于矫正过程基于实际测量得到的畸变值, 因此矫正后的星点显示位置更符合实际情况, 精度也更高。通过经纬仪对矫正后的星点间角距进行测量, 其误差基本保持在 0.017% 以内。



图 6 系统软件界面

Fig. 6 Interface design of system software



图 7 亮度矫正图

Fig. 7 Image of gray correction

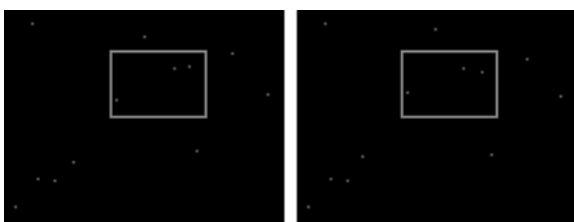


图 8 星图畸变矫正结果

Fig. 8 Results of distortion correction for star image

7 结 论

本文针对星敏感器的仿真测试,设计了一种

高精度的星图模拟系统。介绍了天体投影方法以及星图模拟基本原理,详细设计了系统功能结构,分析了辅助视场标定方法、星表检索、坐标转换、亮度转换以及星图显示等星图模拟的整个过程。

文中针对传统的星等与亮度转换存在的问题,提出了线性和基于实际测量的非线性亮度矫正方法;针对光学畸变导致的星点位置误差,提出了有效的畸变矫正方法,并将星点位置误差控制在 0.017% 以内,最后以 FK5 星表为例进行了实验仿真,构建生成了满足系统要求的高精度模拟星图。该系统可实现对高精度星敏感器的地面标定以及性能进行测试,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 孙高飞, 张国玉, 王凌云, 等. 甚高精度星模拟器星图显示与控制系统研究[J]. 空间科学学报, 2013, 33(3): 308-312.
SUN G F, ZHANG G Y, WANG L Y, *et al.*. Research on star map display and control system of very high accuracy star simulator [J]. *Space Sci.*, 2013, 33(3): 308-312. (in Chinese)
- [2] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
FANG J CH, NING X L, TIAN Y L. *Autonomous Celestial Navigation Principles and Methods for Spacecraft* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 张杰, 张涛, 况涉青. 小型星模拟器系统的设计研究[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 920-927.
ZHANG J, ZHANG T, KUANG SH Q. Design of small simulator system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 920-927. (in Chinese)
- [4] JUANG J N, KIM H, JUNKINS J L. An efficient and robust singular value method for star pattern recognition and attitude determination [J]. *NASA Langley Research Center*, 2003, NASA/TM, 212142.
- [5] 刘夫成, 刘朝晖, 刘文, 等. 基于 STK_matlab 的空间目标序列星图仿真[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3157-3161.
LIU F CH, LIU ZH H, LIU W, *et al.*. Space target sequence image simulation based on STK-matlab [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3157-3161. (in Chinese)
- [6] 赵明波, 刘雨, 陶征宇, 等. 一种机载天文导航星图模拟的实现方法[J]. 光电子技术, 2008, 28(3): 184-192.
ZHAO M B, LIU Y, TAO ZH Y, *et al.*. One method on star image simulation of airborne astronomical navigation [J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, 28(3): 184-192. (in Chinese)
- [7] 李辉, 王安国, 张磊, 等. 船用星敏传感器星图模拟方法[J]. 光电工程, 2013, 40(4): 72-79.
LI H, WANG A G, ZHANG L, *et al.*. A star image simulation method for a marine star tracker [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(4): 72-79. (in Chinese)
- [8] 胡宜宁, 巩岩. 动态星图显示算法的设计与实现[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 849-853.
HU Y N, GONG Y. Design and realization of a dynamic display algorithm for star map [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(3): 849-853. (in Chinese)
- [9] 邹阳阳, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于畸变影响的动态星模拟器星点位置修正方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(4): 468-473.
ZOU Y Y, ZHANG G Y, SUN G F, *et al.*. Star position correction of dynamic star simulation based on distortion effect [J]. *Space Sci.*, 2014, 34(4): 468-473. (in Chinese)
- [10] 朱永兴, 张超, 李帅, 等. 动态等角星图模拟技术[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(5): 329-337.
ZHU Y X, ZHANG CH, LI SH, *et al.*. Dynamic equiangular star map simulating [J]. *Journal of Geomatics Science of Technology*, 2011, 28(5): 329-337. (in Chinese)
- [11] 刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0212003.
LIU H X, REN J W, LIU Z X, *et al.*. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003. (in Chinese)
- [12] 卢佳. 基于虚拟仪器的动态星图显示技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
LU J. *Based on Virtual Instrument Dynamic Star Map Display Technology Research* [J]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] 巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1698-1703.
GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1698-1703. (in Chinese)

作者简介:



卢 岩(1988-),男,安徽六安人,博士研究生,2010 年于安庆师范学院获得学士学位,2013 年于首都师范大学获得硕士学位,主要从事实时图像处理、多核处理与并行计算、嵌入式系统应用技术等方面的研究。E-mail: luyanBIT@126.com



刘洪森(1987-),男,山东淄博人,硕士研究生,2013 年于北京理工大学获得学士学位,主要研究人眼视觉特性的真实影像再现与数字图像处理。E-mail: last.wind@163.com



庄幽文(1990-),男,福建漳州人,硕士研究生,2013 年于北京理工大学获得学士学位,主要从事机器视觉与图像处理算法方面的研究。E-mail: xdestiny@bit.edu.cn



许廷发(1968-),男,黑龙江肇东人,教授,博士生导师,主要从事光电成像探测与识别等方面的研究。Email: ciom_xtf1@bit.edu.cn



高 昆(1974-),男,河南信阳人,副教授,1995 年、2002 年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电成像技术、遥感图像处理、成像光谱应用技术等方面的研究。E-mail: gaokun@bit.edu.cn