

文章编号 1674-2915(2010)05-0486-08

CCD 星图模拟器的设计及验证

郭敬明^{1,2}, 魏仲慧¹, 何昕¹, 张磊¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院 北京 100039)

摘要: 为了方便星图识别算法和星敏传感器性能的测试, 设计了一种 CCD 星图模拟器, 开发了星图模拟软件。采用高分辨率显示设备及平行光管模拟无穷远处平行光, 实现了高质量星图的模拟。通过高精度 QUEST 算法求解姿态, 对模拟的星图进行了验证。计算了 3 颗以上恒星的偏航角、俯仰角和滚动角, 对 100 幅模拟星图进行了统计分析, 结果显示其定位精度已达 98.1%。目前, 该星图模拟器已成功用于实际项目, 为后续的测试星图识别算法提供了良好的依据, 并缩短了开发周期。

关键词: CCD; 星图模拟器; 姿态确定

中图分类号: V448.2 文献标识码: A

Design of CCD star map simulator and its validation

GUO Jing-ming^{1,2}, WEI Zhong-hui¹, HE Xin¹, ZHANG Lei¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,**Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to test the identification algorithms for a star map and evaluate the performance of a star sensor, a CCD star map simulator was proposed and the star map simulation software was developed in this paper. The system used a high-resolution display device and a parallel light tube to simulate the parallel light of an infinite distance to obtain the high quality star map. The validation on star map by an attitude determination algorithm was also presented. By calculating the attitude angles for three stars more accurately, more than 100 star maps were analyzed. The results indicate that the positioning accuracy has reached 98.1%. The designed simulator has been used in a practical operation, the experimental results show that it can offer good information for verifying star map identification algorithm and evaluating star sensor performance, and it also can shorten the development cycle.

Key words: Charge Coupled Device(CCD) ; star map simulator; attitude determination

1 引言

随着航空航天技术的发展, 导弹、卫星、载人飞船等飞行器需要更高的控制精度和可靠性。星敏感器是一种以恒星为参考基准的高精度姿态敏感器, 在各种飞行器的控制系统和姿态测量过程中起着重要的作用。星敏感器具有隐蔽性好、适用范围广、可靠性高、精度高、可独立自主全天候工作的特点^[1, 2]。

星敏感器工作原理是利用探测单元某一时刻捕获星图, 通过图像畸变校正去噪、质心提取、星图识别等一系列算法对星图中未知恒星与导航星库中已知恒星进行匹配识别, 从导航星库中获取此恒星的信息, 达到确定飞行器姿态的目的。速度快且识别率高的星图识别算法是自主导航中的关键技术之一。多年来, 各国学者研究了很多识别算法, 如三角形算法^[3]、神经网络、遗传算法等。由于航天试验费用昂贵, 星图识别算法的调

试以及星敏感器性能的测试, 不可能在研制初期都进行实际星空拍摄, 而是需要在研制星敏感器的同时, 研制高性能的星模拟器^[4, 5]。为了方便星敏感器地面调试, 本文设计了一种 CCD 星图模拟器, 并结合姿态确定算法对星图模拟器进行了验证。目前, 该星图模拟器已成功应用于实际项目中, 为星图识别算法的调试以及性能测试提供了依据。

2 星图模拟器设计

如图 1 所示, 星图模拟器由星图模拟器计算机、显示设备及平行光管组成。星图模拟器计算机运行星图模拟软件产生星图, 然后由显示设备及平行光管模拟无穷远处平行光, 实现高质量星图模拟; 主控计算机发送控制命令给星敏感器, 星敏感器拍摄星图, 进行星图的匹配识别, 确定航天飞行器姿态信息回传给主控计算机, 以达到测试星图识别算法的目的。

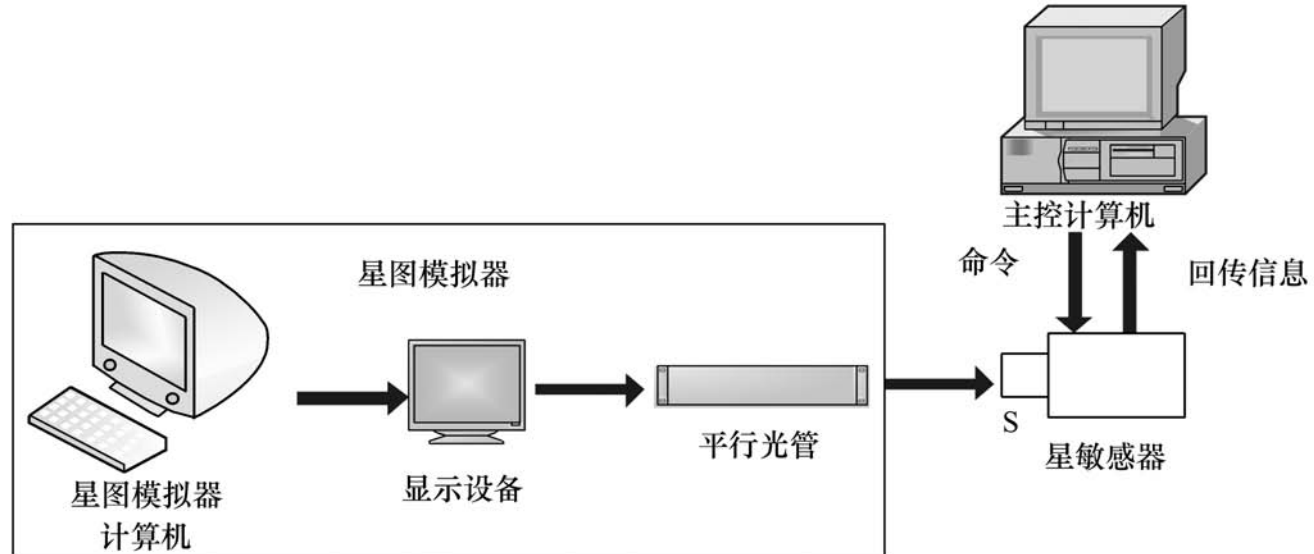


图 1 星图模拟器工作原理图

Fig. 1 Principle of CCD star map simulator

2.1 星图模拟软件

星图模拟软件总流程如图 2 所示。首先随机产生星敏感器视轴指向, 根据星敏感器光轴的赤经和赤纬, 给定星敏感器视场大小、方位角以及焦距等参数, 从观测星库中进行观测星的提取^[6], 然后进行坐标和星等的变换, 选择添加白噪声等噪声, 最后将这些星点以二维图像的形式显示, 实现星空模拟, 如图 3 所示。

坐标变换是星图模拟中关键步骤之一^[7]。由于星敏感器固定安装在飞行器上, 所以只需考虑天球坐标系和星敏感器 CCD 靶面坐标系的变换关系。首先根据星敏感器指向 (C_0, C_0) 以及视场半径 R , 由式(1)确定星敏感器的视场范围 (C, C) :

$$\begin{aligned} C & (C_0 - R/\cos C_0, C_0 + R/\cos C_0) \\ C & (\cos C_0 - R, \cos C_0 + R) \end{aligned} \quad (1)$$



图2 星图模拟软件总流程图

Fig. 2 Flow chart of star map simulation software

考虑处于天球两极的情况,若赤经 C 左边界 $< 0^\circ$; 则 $C = C + 360^\circ$; 若赤经右边界 $C > 360^\circ$;

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \sin C_0 \cos C_0 & -\cos C_0 \sin C_0 \sin C_0 & -\cos C_0 \cos C_0 & -\sin C_0 \sin C_0 \sin C_0 & \cos C_0 \sin C_0 \\ -\sin C_0 \sin C_0 & -\cos C_0 \sin C_0 \cos C_0 & \cos C_0 \sin C_0 & -\sin C_0 \sin C_0 \cos C_0 & \cos C_0 \cos C_0 \\ -\cos C_0 \cos C_0 & & -\sin C_0 \cos C_0 & & -\sin C_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据输入的焦距 f 和视场半径 R 由式 (3) 计算 CCD 靶面尺寸大小 L :

$$L = f \cdot 2 \cdot \tan(R). \quad (3)$$

设上述转换矩阵 \mathbf{M} 元素如下:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据式 (1) 确定的视场范围 (C, C) , 从导航星库 SAO 星表中提取观测星, 计算观测星在 CCD 靶面上的成像坐标 X, Y :

$$\begin{aligned} X_i &= -f \frac{a_1 \bar{x}_i + b_1 \bar{y}_i + c_1 \bar{z}_i}{a_3 \bar{x}_i + b_3 \bar{y}_i + c_3 \bar{z}_i} \\ Y_i &= -f \frac{a_2 \bar{x}_i + b_2 \bar{y}_i + c_2 \bar{z}_i}{a_3 \bar{x}_i + b_3 \bar{y}_i + c_3 \bar{z}_i} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$ 如式 (6) 所示, 第 i 颗观测星的天



图3 星图
Fig. 3 Star map

则 $C = C - 360^\circ$ 。

根据星敏器视轴指向 (C_0, C_0) 以及安装角 C_0 , 计算天球坐标到星敏器坐标的转换矩阵, 如式 (2) 所示:

球坐标为 (C_i, C_i) :

$$\begin{aligned} \bar{x}_i &= \cos C_i \cos C_i \\ \bar{y}_i &= \sin C_i \cos C_i \\ \bar{z}_i &= \sin C_i \end{aligned} \quad (6)$$

计算 X_i, Y_i 是否都在 $-L/2 \sim L/2$, 从而判断第 i 颗观测星是否在 CCD 靶面上成像。若成像在靶面内, 则根据观测星的靶面坐标转换为像素坐标, 视星等转换为对应的灰度值, 产生星图如图 3 所示, 同时显示星号、天球坐标、靶面坐标, 如表 1 所示。

考虑到成像过程中对星图产生影响的诸多因素, 如宇宙背景的辐射、星云星团以及星敏器本身的暗电流噪声等, 通过在星图上添加恒星位置噪声、视星等噪声、点噪声、伪目标等, 模拟真实的星空, 以便测试星图识别算法的稳定性及准确性。

表 1 随机产生的模拟星图

Tab. 1 Data of random star map

输入图像(视轴指向: 赤经 239.904 7°; 赤纬 - 38.219 8°) (焦距为 30.0 mm, 视场半径 7.5°×7.5°; 方位角为 90.0°)					
星号	赤经/(°)	赤纬/(°)	视星等	靶面 X/mm	靶面 Y/mm
248	240.030 4	- 38.396 9	3.41	- 0.927 8	0.515 9
276	240.850 8	- 38.602 5	4.89	- 2.023 7	3.871 7
313	241.647 9	- 36.802 2	4.23	7.357 2	7.311 7
添加位置噪声(赤经、赤纬随机产生 - 1 ~1 内偏差)					
248	240.042 9	- 38.400 8	3.41	- 0.948 3	0.567 2
276	240.846 9	- 38.599 4	4.89	- 2.007 4	3.855 9
313	241.651 0	- 36.786 5	4.23	7.438 9	7.326 2

图 4(a) 为原始星图; 图 4(b) 为添加位置噪声后的星图, 赤经、赤纬随机产生(- 1 ~1) 内偏差; 图 4(c) 为添加点扩散噪声后的星图, 点扩散函数为 5 ×5 矩阵, 标准差为 0.45 pixel; 图 4(d) 为添加星云, 根据视场内恒星个数, 产生不同个数的伪星, 小于 5 颗时, 产生 1 颗星云, 5 ~10 颗时, 产生 2 颗星云, 10 颗以上产生 3 颗星云。表 1 中列出的原始星图与添加位置噪声后星图的详细数据, 由于数据量较大, 添加点扩散噪声与星云目标的星图数据未列出。

2.2 光学显示设备

星图模拟器采用高精度平行光管作为模拟恒星平行光的光学装置。为了能够模拟较大视场的天区恒星分布, 作者自主研制了大视场高精度的平行光管。在设计时, 尽量降低光学系统的畸变、彗差、像散以及倍率色差等不对称像差; 同时还要考虑与星敏传感器入瞳的匹配关系。由于光学系统的焦距长, 带来较大的二级光谱, 为了尽可能地降低二级光谱像差, 设计时采用了色散特殊的光学玻璃, 取得了较好的效果。星模拟器平行光管实物如图 5 所示。

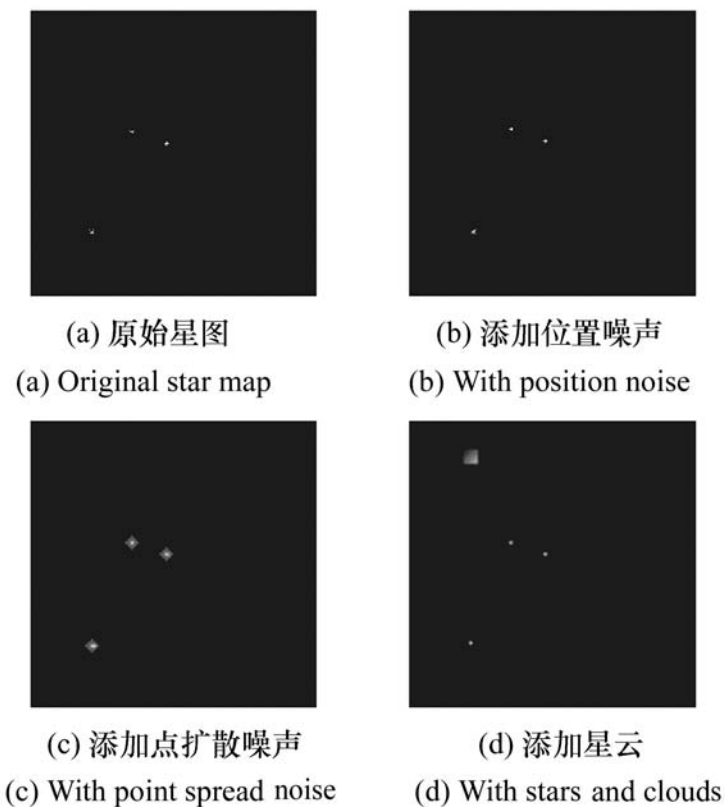


图 4 原始星图与添加噪声后的星图

Fig. 4 Origin star map and noisy star maps



图 5 星模拟器平行光管

Fig. 5 Parallal optical pipe of star simulator

星图模拟器光学指标如表2所示。

表2 星图模拟器光学指标

Tab. 2 Optical parameters of star simulator

参数	参数值
焦距	30 mm
像元数	100 × 100
视场	15° × 15°
畸变	0.05%
传递函数	0.4@ 50 lp/mm

3 验证方法

3.1 姿态确定

基于星敏感器的空间飞行器姿态确定模型, 如式(7)所示:

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}\mathbf{V}$$

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \dots \ \mathbf{w}_N]_{3 \times N}$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \dots \ \mathbf{v}_N]_{3 \times N}$$

$$\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \mathbf{I}$$

只要有二个不同的观测矢量就可以确定空间飞行器的三轴姿态 \mathbf{M} , 对于有多个不同的不平行观测矢量来确定空间飞行器姿态的情况, 就是“超定”问题。寻找一个矩阵 \mathbf{R} 满足下面的损失函数最小:

$$J(\mathbf{R}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \|\bar{\mathbf{w}}_k - \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{v}}_k\|^2 \quad (8)$$

基于矢量观测的姿态确定算法比较典型的有 TRIAD 和 QUEST 算法。本文采用计算精度高的 QUEST 方法^[9]。式(9)中, \mathbf{p}_{opt} 是最大特征值的最优估计, 损失函数 J 将趋向于零。

$$\mathbf{p}_{\text{opt}} = \mathbf{p}_k - J, \quad k > 0 \quad (9)$$

用罗德里格斯参数来表示四元数, 定义如下式:

$$\bar{\mathbf{p}} = \bar{\mathbf{q}}/q_4 = \bar{\mathbf{a}} \cdot \tan \theta, \quad [(\mathbf{p}_{\text{opt}} + \mathbf{I}) \cdot \mathbf{S}] \cdot \bar{\mathbf{p}} = \mathbf{Z} \quad (10)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{B} + \mathbf{B}^T, \quad \mathbf{B} = \sum_{k=1}^N (\bar{\mathbf{w}}_k \cdot \bar{\mathbf{v}}_k^T), \quad \text{trace}(\mathbf{B})$$

$$\mathbf{Z} = [B_{23} - B_{32} \quad B_{31} - B_{13} \quad B_{12} - B_{21}],$$

$$\mathbf{W}_i = 1 / \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2} [x_i \quad y_i \quad -f], \quad (11)$$

$$\mathbf{V}_i = [\cos C_i \cos CW_i \quad \sin C_i \cos CW_i \quad \sin CW_i].$$

利用高斯消去法求得罗德里格斯参数, 就可以计算出四元数, 由姿态四元数确定的姿态转换

矩阵 \mathbf{M} 为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_3 q_4 + q_1 q_2) & 2(q_1 q_2 - q_3 q_4) \\ 2(q_1 q_2 - q_3 q_4) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_1 q_4 + q_1 q_3) \\ 2(q_1 q_3 + q_1 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_4 q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)分别求得偏航角、俯仰角、滚动角

如下式:

$$\theta = \arctan[M(7)/M(6)], \quad \phi = -\arcsin[M(8)], \quad \psi = \arctan[M(2)/M(5)]. \quad (13)$$

3.2 验证与分析

本文采用上述 QUEST 姿态确定算法, 对星图模拟软件产生的星图进行了仿真验证。QUEST 算法中求解罗德里格斯参数是关键步骤之一, 本文采用了高斯-若当消元法^[10]。采用姿态确定求解程序进行验证, 流程如图6所示。

表3中, X 、 Y 分别为 CCD 靶面坐标。根据表3, 按照提示输入观测星个数、CCD 靶面坐标、天球坐标, 即可求取验证结果。分别输入3颗星(576, 611, 620)、4颗星(576, 611, 620, 622)、5颗星(576, 611, 620, 622, 649)及6颗星(576, 611, 620, 622, 649, 652), 求得姿态角(见表3、表4)。

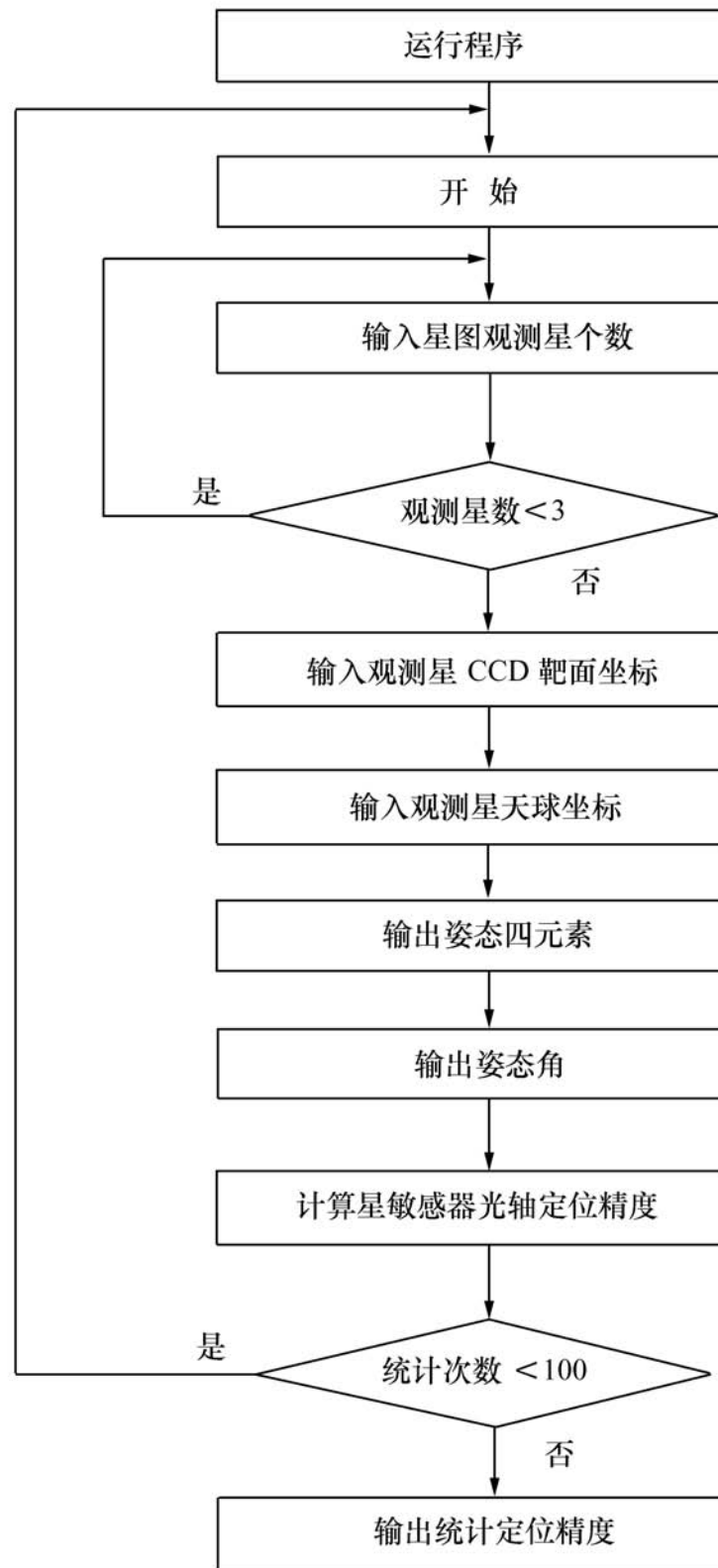


图 6 姿态确定算法验证流程图

Fig. 6 Flow chart of validation for attitude determination algorithm

表 3 输入的模拟星图

Tab. 3 CCD star map of simulation

输入图像(视轴指向: 赤经 134.015 3°, 赤纬 68.998 9°)
(焦距为 30.0 mm, 视场半径 7.5°×7.5°, 方位角为 60.0°)

星号	赤经/(°)	赤纬/(°)	视星等	X/mm	Y/mm
576	130.053 3	64.327 7	4.60	- 1.672 1	- 2.021 5
611	135.636 2	67.629 7	4.76	- 0.790 4	- 0.077 7
620	137.596 6	67.134 7	4.80	- 1.209 4	0.155 6
622	137.729 5	63.513 6	4.67	- 2.951 5	- 0.683 4
649	142.882 0	63.061 9	3.67	- 3.683 6	0.346 0
652	143.620 4	69.830 2	4.56	- 0.374 9	1.809 7

表4 验证结果

Tab. 4 Validation results

姿态角	偏航角/($^{\circ}$)	俯仰角/($^{\circ}$)	滚动角/($^{\circ}$)
3 颗星(576, 611, 620)	134.018 7	69.005 2	60.004 8
4 颗星(576, 611, 620, 622)	134.014 4	69.004 4	59.997 2
5 颗星(576, 611, 620, 622, 649)	134.012 4	69.005 8	59.997 4
6 颗星(576, 611, 620, 622, 649, 652)	134.014 6	69.003 0	59.998 1

结果显示,所求姿态角与模拟星图的视轴指向及方位角相符合,且精度统计随参与计算的观测星数目增加而提高,统计定位精度可达98.1%。

4 结 论

星敏传感器是一种高精度的姿态敏传感器,对星敏传感器的研究与应用在我国航空航天领域越来越受到重视。本文立足于工程应用,设计了一种星图模拟器,开发了星图模拟软件,结合显示设备及

平行光管,可以模拟高质量星图。与文献[11]相比,增加了位置噪声、点扩散噪声及星云等,可更好地模拟真实的星空。采用了高精度的QUEST算法求解姿态,对模拟星图姿态进行了验证,计算偏航角、俯仰角、滚动角,对100幅模拟星图进行了统计分析,结果显示定位精度达98.1%。实验表明,该星图模拟器设计方法可靠,精度高,方便了星敏传感器的地面调试与性能测试,节约了成本,缩短了开发周期。

参考文献:

- [1] 方蓉初. 恒星敏传感器(航天丛书)[M]. 北京: 宇航出版社, 2001.
FANG R CH. *Star Sensor*(Space Flight Series)[M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2001. (in Chinese)
- [2] 郝志航, 王家琪. CCD星跟踪器[J]. 光学精密工程, 1991, (6): 73-78.
HAO ZH H, WANG J Q. CCD star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1991, (6): 73-78. (in Chinese)
- [3] 张磊, 何昕, 魏仲慧, 等. 三角形星图识别算法的改进[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 458-463.
ZHANG L, HE X, WEI ZH H, et al. Modification of triangle identification algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 458-463. (in Chinese)
- [4] 全伟, 房建成. 天文导航系统半物理仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 353-358.
QUAN W, FANG J CH. Hardware in-the-loop simulation of celestial navigation system[J]. *J. System Simulation*, 2006, 18(2): 353-358. (in Chinese)
- [5] 郝胜国, 郝志航. 星敏传感器星像模拟软件的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 208-212.
HAO SH G, HAO ZH H. Study of star map simulation software[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 208-212. (in Chinese)
- [6] 饶才杰, 房建成. 一种星模拟中观测星提取的方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 129-135.
RAO C J, FANG J CH. A way of extracting observed stars for star image simulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 129-135. (in Chinese)
- [7] 许世文, 龙夫年. 实时星场模拟器中的坐标变换[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(5): 118-120.
XU SH W, LONG F N. Coordinate transformation in real-time star field simulator[J]. *J. Harbin Institute Technol.*, 1998, 30(5): 118-120. (in Chinese)
- [8] SHUSTER M D. Three-axis attitude determination from vector observations: a fast optimal matrix algorithm[J]. *J. Astronautical Sci.*, 1996, 41(2): 261-280.
- [9] 史广青, 卢欣, 武延鹏, 等. 基于星敏传感器的两种姿态确定算法比较分析[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(5): 61-64.

SHI G Q, LU X, WU Y P, *et al.* . Tradeoffs of two star-tracker-based attitude determination algorithms[J] . *Aerospace Control and Appl.* , 2009, 35(5) : 61-64. (in Chinese)

[10] 易大义, 沈云宝, 李友法. 计算方法[M] . 杭州: 浙江大学出版社, 2002.

YI D Y, SHEN Y B, LI Y F. *Numerical Computation*[M] . Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002. (in Chinese)

[11] 全伟, 房建成. 高精度星图模拟及有效性验证新方法[J] . 光电工程, 2005, 32(7) : 22-26.

QUAN W, FANG J CH. High-precison simulation of star map and its validity check[J] . *Opto-Electronic Eng.* , 2005, 32(7) : 22-26. (in Chinese)

作者简介: 郭敬明(1985—) , 男, 湖北荆州人, 博士研究生, 主要从事数字图像处理及机械、电子方面的研究。

E-mail: gjm441@ yahoo. com. cn