

文章编号 1004-924X(2019)05-1229-07

## 基于恒星像点轨迹的星图填补

刘先一\*, 张志利, 周召发, 常振军  
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 数字天顶仪是一种通过拍摄星图进行定位的天文仪器, 在采用数字天顶仪拍摄星图时, 由于云层等外部因素会导致拍摄的星图存在星点缺失, 直接影响到仪器的定位精度。为了提高仪器的实用性和对环境的适应性, 本文推导了恒星像点轨迹, 并提出了一种基于恒星像点轨迹的星图填补方法, 该方法构建了缺失星图与相邻两幅星图之间的像点填补模型。实验数据表明, 采用该方法能够对星图进行较好地填补, 通过填补后的星图解算的定位误差在  $0.01''$  以内, 使定位精度基本保持了不变。

**关键词:** 像点轨迹; 星图; 填补模型

**中图分类号:** V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1229

## Star image filling based on stellar image point trajectory

LIU Xian-yi\*, ZHANG Zhi-li, ZHOU Zhao-fa, CHANG Zhen-jun

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

\* Corresponding author, E-mail: 1397559188@qq.com

**Abstract:** Digital zenith camera is an astronomical instrument which is used to locate by taking star images. When taking a star image, there are star points missing in the star image due to external factors such as clouds, and the accuracy of positioning will be affected directly. In order to improve the practicability of the instrument and its adaptability to the environment, the stellar image point trajectory is derived and a star image filling method based on stellar image point trajectory is proposed. This method constructs a filling model between the missing star image and the adjacent two star images. The experimental data shows that the method can better fill the star image. The positioning error calculated by the filled star image is less than  $0.001''$ . The positioning accuracy remains unchanged.

**Key words:** image point trajectory; missing star image; filling model

### 1 引言

随着 CCD 的发展, 数字天顶仪成为一种高精度的天文定位仪器<sup>[1,2]</sup>。国外对数字天顶仪的研

究相对较早, 德国汉诺威大学和瑞士的苏黎世大学最先开展对数字天顶仪的研究, 定位的精度可达  $0.2''$ 。国内对数字天顶仪的研究起步相对较低, 中国科学院与山东科技大学研制了数字天顶仪样机, 西安电子科技大学主要针对数字天顶

收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (No. 41174162)

仪的硬件系统展开研究<sup>[3 5]</sup>,国内对该仪器的研究部分参考了国外的研究内容,在研究的深度和广度上还有待进一步提高。

数字天顶仪通过旋转进行星图的拍摄,在一个定位循环内仪器要拍摄多幅星图。在进行定位解算时,将处于对径位置的两幅星图作为一组解算单元,通过迭代运算完成对于测站点的高精度定位<sup>[6 7]</sup>。在拍摄星图的过程中,由于云层等外部条件限制,将导致拍摄的星图中存在着大面积的星点缺失<sup>[8]</sup>,在进行星图识别时识别的星点数量较少<sup>[9 10]</sup>,直接影响到仪器的定位精度。为了克服天气等外部条件对拍摄星图的影响,提高仪器的实用性和对环境的适应性,拟对星图的填补方法进行研究。当前,研究的重点主要集中在星图识别算法上,而对于星图填补的研究相对较少<sup>[11 12]</sup>。这里针对星图的填补方法展开研究,通过对恒星像点轨迹的分析,构建星图填补模型,完成对缺失星图的填补工作。

## 2 恒星像点轨迹分析

数字天顶仪主要由光学望远镜、CCD 图像传感器、调平系统、控制系统和数据处理系统等构成,如图 1 所示。

数字天顶仪通过旋转至不同的方位完成对于星图的拍摄,数字天顶仪的工作流程为先顺时针旋转拍摄 8 幅恒星星图,然后再逆时针旋转拍摄



图 1 数字天顶仪

Fig. 1 Digital zenith camera

8 幅恒星星图,也就是说在一个定位循环中,数字天顶仪共拍摄 16 幅星图,如图 2 所示。

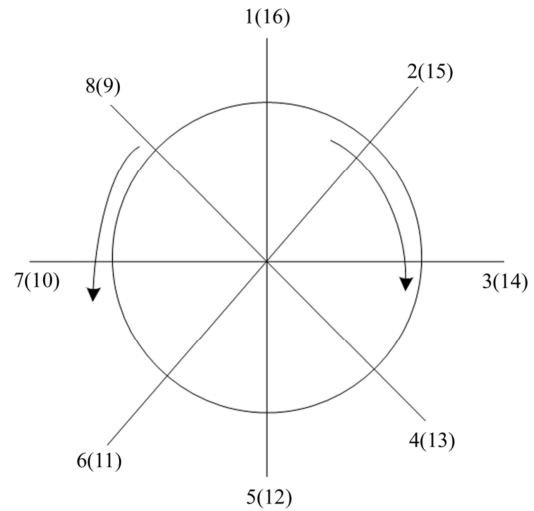


图 2 数字天顶仪的拍摄示意图

Fig. 2 Work process of digital zenith camera

在数字天顶仪拍摄星图的过程中,天空中同一颗恒星可能会在多幅星图中出现。这里首先对恒星的像点轨迹进行分析。在对仪器进行调平后,恒星星光通过数字天顶仪光学焦点在 CCD 图像传感器上成像。以 CCD 图像传感器为基础,两侧边缘方向分别为  $x$  和  $y$  轴构建图像坐标系  $\sigma-xy$ 。另外,以正北指向为  $y_0$  构建坐标系  $\sigma-x_0y_0$ , CCD 图像传感器放置的方位角为  $A$ ,如图 3 所示。

将恒星像点的图像坐标  $(x, y)$  转换至  $\sigma-x_0y_0$  中,则有:

$$\begin{aligned} x_0 &= x \cos A + y \sin A \\ y_0 &= y \cos A - x \sin A. \end{aligned} \quad (1)$$

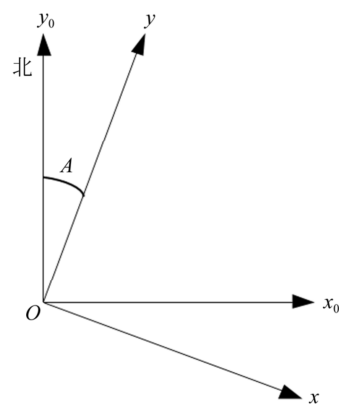


图 3 图像坐标系

Fig. 3 Image coordinate system

当数字天顶仪旋转角度  $\varphi$  至另一方位进行星图拍摄时,同理,以 CCD 图像传感器为基础构建坐标系  $\sigma-x'y'$ 。以北向指向为  $y_{p0}$  构建坐标系  $\sigma-x_{p0}y_{p0}$ ,如图 4 所示。

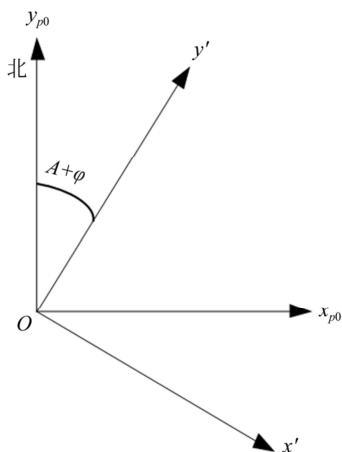


图 4 旋转后图像坐标系

Fig. 4 Image coordinate system after rotating

将恒星像点的图像坐标  $(x', y')$  转换至  $\sigma-x_{p0}y_{p0}$  中,则有:

$$\begin{aligned} x_{p0} &= x' \cos(A + \varphi) + y' \sin(A + \varphi) \\ y_{p0} &= y' \cos(A + \varphi) - x' \sin(A + \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

这里要做的就是解算出旋转前恒星像点图像坐标  $(x, y)$  与旋转后恒星像点图像坐标  $(x', y')$  之间的关系。仪器在旋转的过程中,地球也在进行自转,自转角度  $\theta = 15''t$ ,  $t$  表示拍摄两幅星图时间的时间间隔。由于拍摄两幅星图之间的时间间隔角度,这里  $\theta$  可以作为小角度处理。仪器在拍摄星图时所处地理位置的纬度值为  $\varphi$ 。分析可知坐标系  $\sigma-x_0y_0$  与坐标系  $\sigma-x_{p0}y_{p0}$  之间可进行旋转变换,这里进行的是坐标之间的姿态变化。先绕  $x$  轴旋转  $\varphi$  角,之后绕  $y$  轴旋转  $\theta$  角,再绕  $x$  轴旋转  $-\varphi$  角。恒星光经过仪器焦点  $f$  成像。在坐标系  $\sigma-x_0y_0$  中,星光矢量方向为  $(x_0, y_0, -f)$ ,将该矢量转换至坐标系  $\sigma-x_{p0}y_{p0}$  中,则有:

$$(-x_0, -y_0, f) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

在坐标系  $\sigma-x_{p0}y_{p0}$  中,星光矢量方向为  $(x_{p0}, y_{p0}, -f)$ 。由于恒星处于无穷远处,恒星光可

视为平行光。

结合式(3),则有:

$$\begin{aligned} \frac{x_{p0}}{x_0 \cos \theta + y_0 \sin \varphi \sin \theta - f \cos \varphi \sin \theta} &= \\ \frac{y_{p0}}{-x_0 \sin \theta \sin \varphi + y_0 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \cos \theta) + f (\sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \cos \varphi \cos \theta)} &= \\ \frac{-f}{-x_0 \sin \theta \cos \varphi + y_0 (\sin \varphi \cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \cos \varphi) - f (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \cos \theta)}. \end{aligned} \quad (4)$$

对式(4)进行化简后可得:

$$\begin{aligned} x_{p0} &= x + y \theta \sin \varphi - f \theta \cos \varphi \\ x' &= x (\cos \varphi + \theta \sin \varphi \sin \varphi) - y (\sin \varphi - \theta \sin \varphi \cos \varphi) - f \theta \cos \varphi \cos(A + \varphi) \\ y' &= y (\cos \varphi + \theta \sin \varphi \sin \varphi) + x (\sin \varphi - \theta \sin \varphi \cos \varphi) - f \theta \cos \varphi \sin(A + \varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)即恒星像点的轨迹,恒星的像点轨迹与旋转角度  $\varphi$ 、方位角  $A$ 、测站点的纬度  $\varphi$  和地球自转角  $\theta$  相联系。当选定测站点位置时,度旋转角度  $\varphi$  通过仪器的控制系统可以准确获得,方位角  $A$  和测站点位置的纬度  $\varphi$  都是定值,地球自转角  $\theta$  通过 GPS 授时系统精确获得。像点轨迹的误差主要来源于星点的提取误差,该误差主要是由算法及噪音等造成的,这里将星点提取误差作为系统常量进行处理。

联立式(1),式(2)和式(5)可得:

### 3 星图填补方法

式(6)为恒星像点轨迹,但是在进行星图填补时,方位角  $A$  和测站点的纬度  $\varphi$  是未知量,为此,通过对式(6)进行对比分析,可将恒星像点轨迹转化为如下类型:

$$\begin{aligned} x' &= ax - by + c_1 \\ y' &= bx + ay + c_2, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $a, b, c_1, c_2$  为依据式 (6) 设置的参数,  $a = \cos \varphi + \theta \sin \varphi \sin \varphi, b = \sin \varphi - \theta \sin \varphi \cos \varphi, c_1 = f \theta \cos \varphi \cos (A + \varphi) + \Delta x, c_2 = f \theta \cos \varphi \sin (A + \varphi) + \Delta y$ 。在  $c_1, c_2$  中包含了由星点提取误差带来的轨迹误差。

为完成对缺失星图的填补,这里主要依赖缺失星图相邻的两幅星图。首先对缺失星图及相邻两幅恒星星图分别进行星图识别。通过识别的星点数据,分别找到缺失星图与相邻两幅星图之间相同的恒星,针对相邻的两幅星图,分别构建如下矩阵:

$$\begin{pmatrix} x & -y & 1 & 0 \\ y & x & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}. \quad (8)$$

通过式(8)解算获得参数值  $a, b, c_1, c_2$ , 这样可以得到恒星的像点轨迹。将该相邻星图中其他恒星的图像坐标  $(x_e, y_e)$  带入到恒星像点轨迹中,解算该恒星在缺失星图中的坐标值,当解算后的星点图像坐标值满足式(9)时,该星点可作为缺失星对星图进行填补。

$$\begin{cases} |ax_e - by_e + c_1| \leq h \\ |ay_e + bx_e + c_2| \leq h \end{cases} \quad (9)$$

$h$  表示 CCD 图像传感器边长的像素值。依据星点轨迹计算缺失像点时,由相邻的两幅星图获取的解算结果中存在着相同的像点,对这些像点的坐标进行均值处理,将均值作为填补像点的图像坐标。

## 4 试验数据分析

试验过程中采用的数字天顶仪视场角大小为  $3^\circ \times 3^\circ$ , 焦距值为 600 mm。CCD 采用 KAF-16 803 全画幅图像传感器,分辨率为  $4\,096 \times 4\,096$ , 像素大小  $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ 。采用仪器进行星图的拍摄,其中的缺失星图如图 5 所示。



图 5 星图

Fig. 5 Star image

为了验证通过恒星轨迹进行星图填补的正确性与可行性,随机选择连续拍摄的三幅正常星图作为试验数据。分别对三幅星图进行识别。随机取出第 2 幅星图部分范围的识别数据作为缺失星点,第 2 幅星图的识别数据如表 1 所示。

表 1 识别的星点数据

Tab. 1 Identified star data

星点类型	恒星星点		星表数据		
	CCD $x/\text{pixel}$	CCD $y/\text{pixel}$	天文经度/ $^\circ$	天文纬度/ $^\circ$	星表序号
参考星以外的识别数据	4 019.80	2 025.90	110.835 34	35.257 49	54 581
	3 111.63	1 183.71	110.514 54	34.225 41	54 491
	3 299.50	1 635.97	110.422 43	34.639 67	54 460
	2 788.52	795.81	110.452 15	33.794 31	54 471
	3 062.27	2 463.78	109.739 21	35.124 50	54 239
	3 153.20	1 905.53	110.140 36	34.765 54	54 369
	3 656.11	1 669.41	110.716 83	34.830 35	54 548
	1 398.92	288.57	109.541 49	32.774 84	54 183
	1 383.51	498.30	109.409 98	32.917 89	54 134

续表 1 识别的星点数据  
Tab.1 Identified star data

星点类型	恒星星点		星表数据		
	CCD $x$ /pixel	CCD $y$ /pixel	天文经度/(°)	天文纬度/(°)	星表序号
选取的缺失星	150.83	2 797.99	107.026 49	33.958 13	53 377
	1 337.61	3 622.10	107.554 04	35.121 70	53 525
	57.70	3 000.04	106.827 51	34.054 67	53 305
	237.96	2 749.96	107.128 70	33.967 08	53 404
	1 524.57	2 461.49	108.401 36	34.388 43	53 801
	459.30	1 571.10	108.008 01	33.240 04	53 673
	2 235.55	1 827.56	109.384 69	34.275 88	54 119
	2 078.56	1 751.05	109.292 42	34.146 25	54 086
	2 496.93	2 390.93	109.286 15	34.803 92	54 084

第 2 幅星图中的星点分布如图 6 所示。

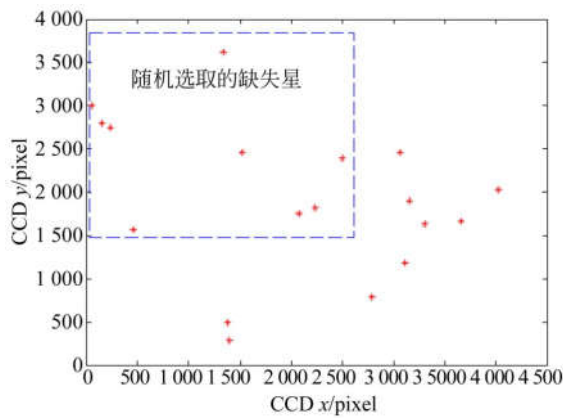


图 6 星点的分布

Fig.6 Distribution of star point

结合第 1 幅星图识别的星点数据与第 2 幅星图排除随机选取的缺失星后的星点数据,依据星表中的序号,筛选出相同的恒星。如表 2 所示。

进行数据解算,可得参数  $a=0.708 6, b=0.705 8, c_1=-194.157 4, c_2=96.010 0$ 。同理,结合第 3 幅星图识别的星点数据与第 2 幅星图排除随机选取的缺失星点后的星点数据,可解得参数  $a=0.708 6, b=0.705 6, c_1=196.677 4, c_2=-120.862 0$ 。根据星点轨迹对第 2 幅星图进行填补,如图 7 所示。

从图 6 与图 7 的比较中可知,通过恒星星点轨迹能够较好地完成对于星图的填补。分别采用

填补后的星图与原始星图进行的定位解算,定位的精度如图 8 所示,从图中可以得出解算的天文经度与天文纬度的误差值均小于  $0.01''$ ,定位精度可视为一致,表明星图的填补效果较好。

表 2 相同的恒星

Tab.2 Same stars

序号	第 1 幅星图		第 2 幅星图		星表序号
	CCD $x$ /pixel	CCD $y$ /pixel	CCD $x$ /pixel	CCD $y$ /pixel	
1	656.140	2 625.92	459.30	1 571.10	53 673
2	2 725.06	3 459.89	1 337.61	3 622.10	53 525
3	1 379.95	3 921.46	57.70	3 000.04	53 305
4	553.480	1 213.63	1 383.51	498.30	54 134
5	416.50	1 054.50	1 398.92	288.57	54 183
6	2 038.88	2 505.44	1 524.57	2 461.49	53 801
7	1 303.32	3 712.89	150.83	2 797.99	53 377
8	1 758.85	433.04	2 788.52	795.81	54 471
9	2 261.06	479.98	3 111.63	1 183.71	54 491
10	3 129.91	1 422.24	3 062.27	2 463.78	54 239
11	2 713.14	668.03	3 299.50	1 635.97	54 460
12	1 929.76	1 611.21	2 078.56	1 751.05	54 086
13	2 095.31	1 554.48	2 235.55	1 827.56	54 119
14	2 800.35	962.43	3 153.20	1 905.53	54 369
15	2 989.66	440.33	3 656.11	1 669.41	54 548

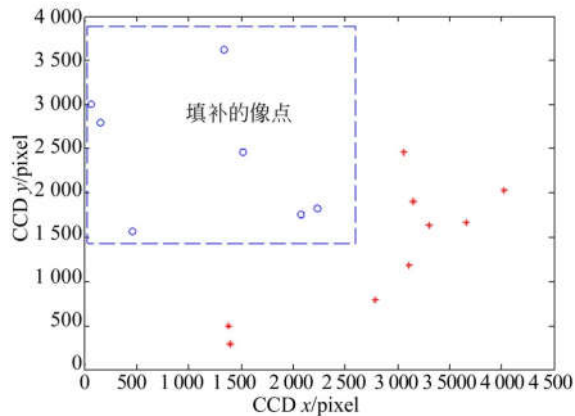


图 7 填补的像点  
Fig. 7 Filling star point

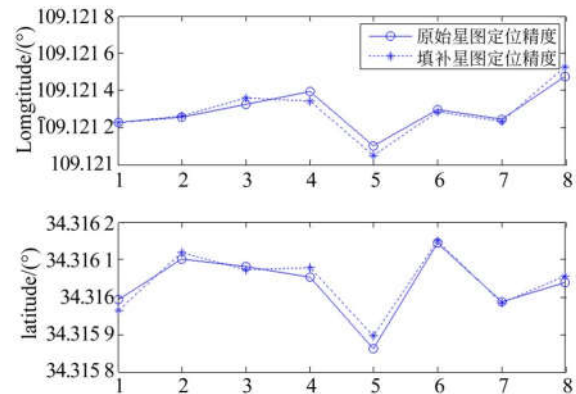


图 8 定位精度的比较  
Fig. 8 Comparison of precision

## 5 结 论

采用数字天顶仪拍摄星图进行定位时,由于云层等环境因素会导致拍摄的星图存在着一定的

星点缺失。为了提高仪器的工作效率以及对环境的适应性,这里分析了恒星的像点轨迹,依靠相邻的两幅星图完成对缺失星图的填补,采用填补的星图进行定位,定位的误差在  $0.001''$  以内,星图填补的效果较好。

### 参考文献:

- [1] 郭敏, 张红英. CCD 数字摄影在天文定位测量中的运用探讨[J]. 测绘技术装备, 2005, 7(1): 28-29. GUO M, ZHANG H Y. The application of CCD in the astronomy orientation[J]. *Measurement Technology Equipment*, 2005, 7(1): 28-29. (in Chinese)
- [2] 宋来勇. 基于 CCD/GPS 垂线偏差测量理论算法研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2012. SONG L Y. *Research on Theory and Algorithm for Measuring of Vertical Deflections Based on CCD and GPS*[D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] HIRT C, SEEBER G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D [J]. *Springer*, 2008, 8(2): 347-356.
- [4] KEREM H, RASIM D, Haluk Ozener. Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in turkey[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2012, 1(2): 115-120.
- [5] 田立丽, 郭金运, 韩延本, 等. 我国的数字化天顶望远镜样机[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1094-1099. TIAN L L, GUO J Y, HAN Y B, *et al.*. Digital zenith telescope prototype of China[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2014, 59(12): 1094-1099. (in Chinese)
- [6] 周召发, 刘先一, 张志利, 等. 基于数字天顶仪的双轴倾角仪研究[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 21-26. ZHOU ZH F, LIU X Y, ZHANG ZH L, *et al.*. Research on two-axis tilt sensor based on digital zenith camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 21-26. (in Chinese)
- [7] 王博, 田立丽, 王政, 等. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1100-1107. WANG B, TIAN L L, WANG ZH, *et al.*. The image and data processing in digital zenith camera [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2014, 59(12): 1100-1107. (in Chinese)
- [8] 施航, 朱志刚. 星敏感器星图处理研究[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(6): 58-60. SHI H, ZHU ZH G. Image processing of star sensor [J]. *Optics & Optoelectronics Technology*, 2014, 12(6): 58-60. (in Chinese)
- [9] 刘晓平, 何士双. 基于三角划分的多连通域图形匹配研究[J]. 工图图学学报, 2010, 31(1): 61-66. LIU X P, HE SH SH. Research on graphics matching of multiply connected region based on triangulation [J]. *Journal of Engineering Graphics*,

2010,31(1):61-66. (in Chinese)

- [10] 张仁斌,王鹿,李钢. 一种基于三角形的快速星图识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 10(30):170-173.

ZHANG R B, WANG L, LI G. Quick star map identification algorithm based on triangle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 10(30):170-173. (in Chinese)

- [11] 崔祥祥,王宏力,陈聪,等. 星三角形识别中的选星

策略及实现[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 3(20):296-299.

CUI X X, WANG H L, CHEN C, *et al.*. Star selection strategy and realization in star triplet identification [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 3(20):296-299. (in Chinese)

- [12] HIRT C. Prediction of vertical deflections from high-degree spherical harmonic synthesis and residual terrain model data [J]. *Springs*, 2010, 179-180.

#### 作者简介:



刘先一(1991—),男,河南信阳人,博士研究生,2013年于第二炮兵工程大学获得学士学位,主要从事定位技术研究。E-mail: 1397559188@qq.com



张志利(1966—),男,河南濮阳人,博士,教授,1988年、1991年、2001年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事定位定向、基准传递技术以及仿真技术的研究。E-mail:effort Yao@163.com

(本栏目编辑:秦 思)

### 《光学 精密工程》2020 年 征订单

订阅单位		邮政编码	
详细地址		收件单位	
刊物名称		订数	每套定价
《光学 精密工程》			1200.00
合计(大写)		经手人	

---

### 《光学 精密工程》2020 年 征订单

订阅单位		邮政编码	
详细地址		收件单位	
刊物名称		订数	每套定价
《光学 精密工程》			1200.00
合计(大写)		经手人	

---

### 《光学 精密工程》2020 年 征订单

订阅单位		邮政编码	
详细地址		收件单位	
刊物名称		订数	每套定价
《光学 精密工程》			1200.00
合计(大写)		经手人	

注:此单只作订单,不做报销凭证。订单填好,请一并将汇款寄出,款到即寄出正式发票。

邮局汇款:长春市东南湖大路 3888 号

《光学 精密工程》编辑部(收)

银行帐户:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

帐 号:220801471908091001

开户银行:中国银行吉林省分行营业部

联系电话:(0431)86176852 传真:(0431)84613409

联 系 人:周天恩