

文章编号 1004-924X(2014)11-3074-07

基于星图识别的空间目标快速天文定位

张磊*, 何昕, 魏仲慧, 郭敬明

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:本文提出了一种基于星图识别的快速定位算法用于加快空间目标的定位速度和提高定位精度。首先,采集当前图像的拍摄时刻和编码器角度值,运用天文定位三角形建立的地平坐标系与地惯坐标系的转换关系,计算设备视轴在地惯坐标系中的指向;然后,由视轴指向所在的天区,提取出该天区所有的导航星与特征库;结合有初始指向的局部星图识别建立图像中背景恒星星像与导航星的对应关系。最后,根据小孔成像原理,通过已识别的背景参考恒星以角距离匹配的方式对空间目标进行相对定位。对 $4^\circ \times 4^\circ$ 视场、分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 的实际图像的试验结果表明,因定位过程中引入了天文定位三角形模型和星图识别,大大加快了空间目标的定位速度,初始定位速度平均约为 400 ms;又因采用相对定位的方式排除了影响定位精度的因素,空间目标的定位精度优于 $2''$ 。

关键词:空间目标;星图识别;天文定位;最小二乘法

中图分类号:V556;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.3074

Fast celestial positioning for space objects based on star identification

ZHANG Lei*, HE Xin, WEI Zhong-hui, GUO Jing-ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zlxrl@tom.com

Abstract: A fast celestial positioning method based on star identification was proposed to improve positioning accuracy and reduce positioning time. Firstly, the photographic time and angular values were acquired, and the pointing direction of boresight in geocentric inertial coordinate system was calculated by transforming a horizontal coordinate system into a geocentric inertial coordinate system with an astronomical triangle model. Then, all navigation stars and patterns in the area that the boresight pointed were extracted, and the corresponding relationship between stars in images and in the sky was established by a region star match. Finally, the celestial positioning for a space object was completed relatively by reference stars in a background according to pinhole imaging model. The experiment for an image with a FOV of $4^\circ \times 4^\circ$ and a resolution of $1\,024 \times 1\,024$ shows that the course of the positioning for the space object has been greatly accelerated due to the introduction of astronomical triangle model and region star match, and the positioning speed is approximately 400 ms. On the other hand, the positing accuracy of a space target is better than $2''$ because the relative positioning method eliminates a lot of factors effecting the accuracy.

Key words: space-object; star identification; celestial positioning; least square

收稿日期:2013-11-13;修订日期:2014-01-13.

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿项目

1 引 言

随着新技术装备的不断涌现和未来太空作战趋势的加剧,地球外层空间正逐步变成新的军事斗争领地。在这种新的军事斗争形式下,空间目标的测探定位对于空间目标的探测跟踪、定位定轨预报、识别编目、侦查和分析发挥着基础性和关键性的作用。它不仅探究潜在敌人的空间能力,还可以对可能发生的碰撞和对己方空间系统的攻击进行规避或告警等,具有重要的军事应用价值,也为未来空间资源的合理利用提供了基础性保障^[1]。

自 20 世纪 60 年代以来,地基空间目标探测系统一直是世界各国重点发展的航天测控系统之一。与雷达探测系统相比,光学探测系统具有测量精度高、直观性强、技术成熟、投资成本低、能够对空间目标进行有效搜索和跟踪等优点,而且采用光学定位空间目标的方法是一种被动、无源的探测手段,这一特点在战时具有极高的应用价值。

当前大部分空间目标的光学定位基本采用地平坐标系测量,实践表明地平式光电测量设备的精度和稳定性更好。这种方法通过目标脱靶量和设备指向读数间接测定空间目标位置,实质是以站心坐标系作为中间参考系,相对中间参考系确定设备参数和空间目标位置,然后通过观测恒星将中间参考系和地心惯性参考系联系起来,监测设备参数随时间变化,通过内插到观测时刻的设备参数值来确定空间目标在地心惯性参考系的位置。这种定位方法基本采用事后处理方式,影响空间目标定位精度的因素主要有:脱靶量的测量误差、大气折射误差、设备轴系误差、设备动态误差、设备调平误差以及坐标系转换过程中的计算误差^[2],总定位误差可达几十角秒甚至上百角秒。

随着 CCD 技术的进步,各种增强型 CCD 的出现和应用^[3-4]使光电测量设备在达到相同探测能力的同时,可以进一步减小曝光时间、焦距、口径,并可以进一步扩大视场,从而有利于同时观测空间目标和恒星背景。基于此,本文提出了一种基于星图识别的快速目标定位算法。该算法借助于天文定位三角形建立的地平与地惯坐标系的转换模型得到设备的初始视轴指向,通过有初始指向的局部星图识别算法快速得到参考星与天球中恒星的对应关系,然后以相对定位的方式由参考星确定空间目标的位置。

2 空间目标的高精度快速天文定位

为了提高空间目标的定位精度,可以采用短焦距大视场的光电测量设备。在拍下待测空间目标的同时,可以拍摄星空背景中足够多的参考星,只要已知参考星的位置信息,就能够确定待测空间目标的位置。星图识别算法是星敏传感器中的关键算法,它的作用就是建立星图中星像点与地惯坐标系中恒星之间的对应匹配关系,从而获取参考星的位置信息。那么,如何利用星图识别快速获取参考星位置信息以及如何利用多星定位未知空间目标就成为本方法中的关键问题。

2.1 快速星图识别

星图识别是星敏传感器中较为成熟的算法,通过星图识别能够获取星图中各参考星的星等、位置坐标等信息。目前能够应用于实际工程的星图识别算法中,以原理简单、易于实现的三角形识别算法居多,虽然三角形识别算法存在一些缺陷,但国内外相关学者经过研究改进,已经使其可以达到很高的识别命中率^[5-7]。其中一项改进就是利用先验信息缩小搜索范围。由于恒星布满天球,而设备的视场也只能覆盖天球的一小部分,视场内的恒星数量与整个天球相比不到 1%,如果每次计算都要遍历导航星库中的所有恒星信息,效率非常低。本文通过结合天文定位三角形和按球矩阵划分的导航星库^[5],实现了快速星图识别。

图 1 为天文定位三角形, O 为测站, Z 为天顶, P 为北天极, σ 为设备视轴在地心惯性坐标系中的指向,已知测站天文经纬度分别为 λ, φ , 由定位三角形可得地平式光电测量设备视轴指向的时角 t 、赤纬 δ ;

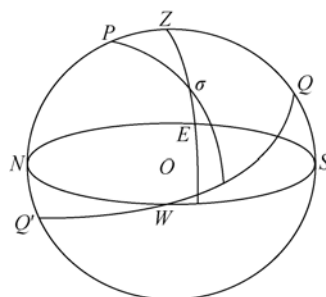


图 1 天文定位三角形示意图

Fig. 1 Triangle diagram of astronomical positioning

$$\begin{cases} \cos\delta \cdot \sin t = -\sin A \cdot \cos E \\ \cos\delta \cdot \cos t = \sin E \cdot \cos\varphi - \sin\varphi \cdot \cos E \cdot \cos A, \\ \sin\delta = \sin\varphi \cdot \sin E + \cos\varphi \cdot \cos E \cdot \cos A \end{cases} \quad (1)$$

$$t = S_0 + (D - 8^h)(1 + \mu) + \lambda - \alpha$$

其中: A, E 分别为光电测量设备的方位角、高低角编码器值, 此处方位角以天文北点起算; λ, φ 分别为测站的天文经、纬度; t, α, δ 分别为视轴指向的时角、视赤经、视赤纬; S_0 为世界时零点时的真恒星时; μ 为民用时化恒星时系数, 取 $\mu = 0.002\ 737\ 91$; D 为北京标准时 (h, m, s)。

此处列出 3 个公式是为了判断时角 t 的象限, 假设设备编码器的误差可忽略不计, 经计算可得设备视轴指向的赤经、赤纬 (α, δ)^[8-9]。

得到设备视轴在赤惯坐标系中的指向后, 根据视轴指向计算了视轴所在天区序号。考虑到各种不确定性, 可将天区边界适当扩大, 提取该天区内所有导航星和特征库用于局部星图识别。由于缩小了导航星库的搜索范围, 局部星图识别的执行效率很高。本文先采用基于导航星计数的三角形识别算法^[10], 以星角距为识别特征, 利用三角形三边间的相关性识别出图像中的星像三角形; 然后在此基础上, 以匹配组法识别出其它星像目标^[11]。通过局部星图识别初次识别成功后, 就可以利用星敏感器中的星跟踪算法对已识别的星进行快速跟踪识别, 因为已经存在较多的先验信息, 星跟踪时间远远小于初次局部星图识别所用的时间。

2.2 利用多星的高精度天文定位

经星图识别确定了星图中的星像与恒星的对应关系后, 就可以依据小孔成像原理, 通过多星对待测空间目标进行高精度定位, 如图 2 所示, 空间目标到已知参考星之间的星角距与成像后的星角距匹配, 因此, 以空间目标到参考星在设备坐标系中计算出的星角距为参考量, 通过星角距公式可计算出空间目标的位置。

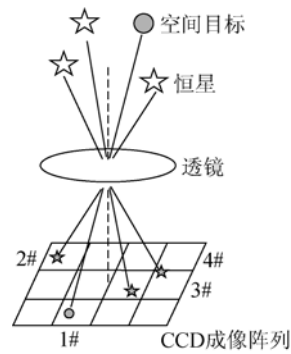


图 2 小孔成像模型示意图

Fig. 2 Schematic of pinhole imaging model

星角距计算公式见式(2):

$$\cos e_i = \sin(\delta_i) \times \sin(\delta') + \cos(\delta_i) \times \cos(\delta') \times \cos(\alpha_i - \alpha') \quad (2)$$

假设与已识别星像点对应的参考星在地惯坐标系中的坐标为 (α_i, δ_i) , 待测空间目标的坐标为 (α', δ') , $\cos e_i$ 由图像中已识别星像点与待测空间目标的星像点计算得到。式中有 2 个未知数, 理论上只要识别出 2 颗参考星即可完成待测空间目标的定位。

将上式展开, 星角距展开式见式(3):

$$\begin{aligned} \cos e_i = & \sin(\delta_i) \times \sin(\delta') + \cos(\delta_i) \times \\ & \cos(\delta') \times \cos(\alpha_i) \times \cos(\alpha') + \\ & \cos(\delta_i) \times \cos(\delta') \times \sin(\alpha_i) \times \\ & \sin(\alpha') = l_i \times x + m_i \times y + n_i \times z \end{aligned} \quad (3)$$

式中: 图像中已识别参考星的单位矢量为:

$$\begin{cases} l_i = \cos\delta_i \times \cos\alpha_i \\ m_i = \cos\delta_i \times \sin\alpha_i; \\ n_i = \sin\delta_i \end{cases}$$

待测空间目标的单位矢量为:

$$\begin{cases} x = \cos(\delta') \times \cos(\alpha') \\ y = \cos(\delta') \times \sin(\alpha') \\ z = \sin(\delta') \end{cases}$$

扩展后的星角距公式有 3 个未知数, 定位待测空间目标要求识别 3 颗参考星, 代入方程可解出待测空间目标的单位矢量 (x, y, z) , 然后计算待测空间目标在地惯坐标系下的坐标 (α', δ') 。这种方式比直接计算 (α', δ') 要更容易。

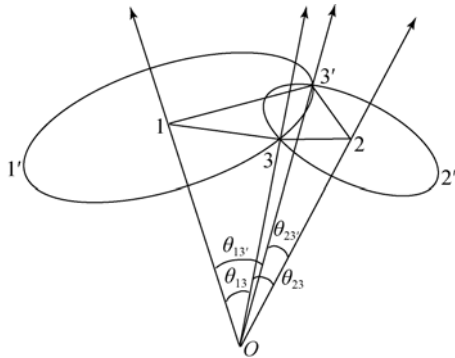


图 3 两颗星确定空间目标位置

Fig. 3 Diagram of celestial positioning determined by 2 reference stars

如图 3 所示,1 和 2 是两颗已知参考星,根据与待测空间目标的角距离可画出两个轨迹圆,交于 3 与 3'两点,也就是说通过两颗已知参考星求出的空间目标位置中存在一个干扰值,需将其排除,而通过三颗已知导航星的计算结果只有一个,不存在奇异性。为了达到较高的定位精度,通常会利用更多的参考星数据。本文采用基于最小二乘法的思想减小误差,求解空间目标位置,由最小二乘法原理^[12],将上述星角距展开式移项并平方,叠加后得:

$$Q = \sum_{i=1}^k [l_i \times x + m_i \times y + n_i \times z - \cos e_i]^2.$$

为使 Q 有最小值,应有下述方程组成立:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = \sum_{i=1}^k l_i^2 \cdot x + \sum_{i=1}^k l_i \cdot m_i \cdot y + \sum_{i=1}^k l_i \cdot n_i \cdot z - \sum_{i=1}^k l_i \cdot \cos e_i = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial y} = \sum_{i=1}^k l_i \cdot m_i \cdot x + \sum_{i=1}^k m_i^2 \cdot y + \sum_{i=1}^k m_i \cdot n_i \cdot z - \sum_{i=1}^k m_i \cdot \cos e_i = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial z} = \sum_{i=1}^k l_i \cdot n_i \cdot x + \sum_{i=1}^k m_i \cdot n_i \cdot y + \sum_{i=1}^k n_i^2 \cdot z - \sum_{i=1}^k n_i \cdot \cos e_i = 0 \end{cases}$$

解方程组得到未知数 x, y, z ,即可由待测空间目标的单位矢量得到地惯坐标系中的坐标 (α', δ') 。

3 试验结果

选择晴朗夜晚拍摄的星图,采用某型号光测设备对本文方法进行验证。本文所使用的星相机焦距为 200 mm,视场较大,为 $4^\circ \times 4^\circ$,图像分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 。天文定位计算机选用 P4 3.0 CPU 的便携式工控机。在拍摄星图前,对设备进行了简单的调平与寻北。由于该星相机与主探测器位于不同光路,存在视轴不平行度,但由于星相机视场较大,因此计算得到的主探测器视轴指向仅为星相机提供指向的大致天区即可,视轴不平行度带来的较小的误差对最终结果没有影响,故没有进行修正。

试验中采用静态的拍摄方式对星空成像,文中仅列出其中一组图像的数据处理结果,星图及

目标提取结果如图 4 所示。

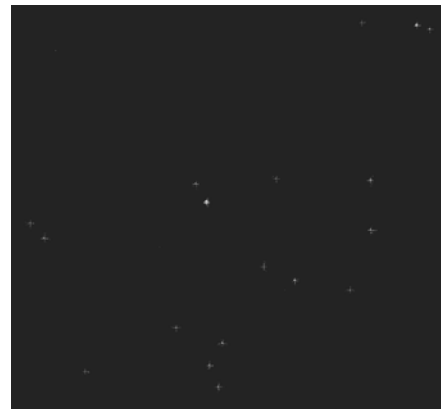


图 4 星图及目标提取结果

Fig. 4 Star image and object extraction

对拍摄得到的连续 100 幅星图根据设备的编码器和拍摄时刻,计算得到主探测器的视轴指向,如图 5 所示。提取星表中当前时刻主探测器视轴指向天区的所有恒星和特征量,进行有初指向的局部星图识别,得到星相机的实际视轴指向如

图 6 所示。

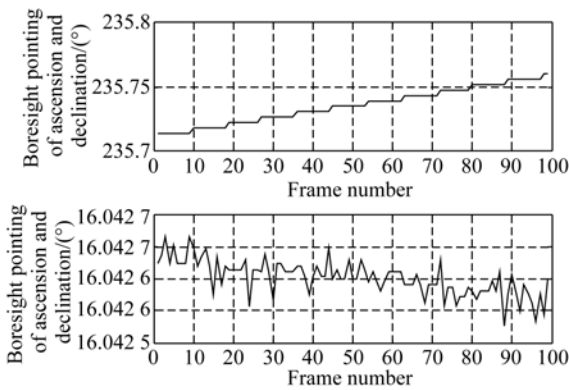


图 5 设备主探测器的视轴指向

Fig. 5 Pointing direction of main detector

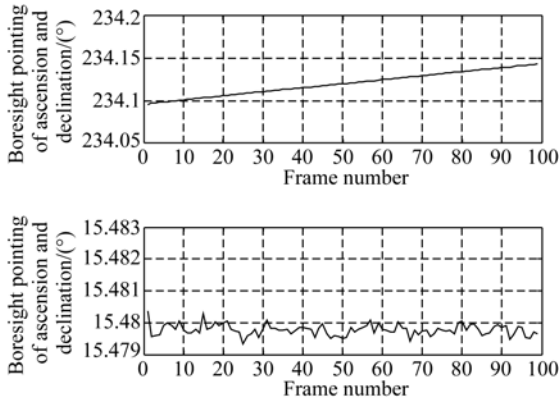


图 6 星相机的视轴指向

Fig. 6 Pointing direction of star camera

以星图中某颗已知的恒星目标作为待测空间目标,在此选择地惯坐标为 (234. 121 841, 16. 119 087) 的恒星作为待测空间目标,再利用其它已识别恒星目标来定位该待测空间目标的地惯坐标 (α'_i, δ'_i) 。图 7 为采用最小二乘法定位该待测空间目标的误差曲线。由图可知,赤经方向均方差 $\sigma_\alpha = 1.03''$,赤纬方向均方差为 $\sigma_\delta = 0.91''$,总误差 $\sigma = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\delta^2} < 2''$,初始定位速度平均约为 400 ms,该时间是采用局部星图识别算法并进行定位所使用的时间,如果采用星跟踪算法并进行定位,所消耗的时间可控制在 50 ms 以内。

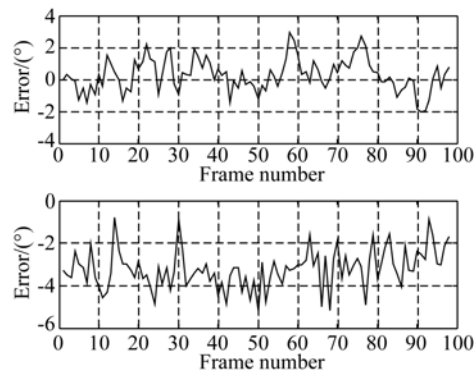


图 7 待测空间目标天文定位误差曲线

Fig. 7 Positioning errors of measured space object

待测空间目标的天文定位方法实质是计算线性方程组 $Ax=b$ 的最小二乘解。计算过程中,定位精度除了受星像质心坐标的提取误差、参考星数目不足等因素影响外,还在一定程度上受参考星几何分布的影响。因最小二乘法定位待测空间目标暗含矩阵求逆运算,系数矩阵 A 由导航星矢量阵构成,认为是精确的,且为非奇异阵,假设 b 存在测量误差 Δb ,即为星像质心坐标的提取误差引起的星角距误差, Δb 对待测空间目标坐标 x 的影响与 $\text{cond}(A)$ 有关,即 x 的稳定性在一定程度上受参考星的几何分布的影响^[13]。以某幅图像中任意 4 颗参考星定位待测空间目标并对结果进行统计,结果如图 8 所示。

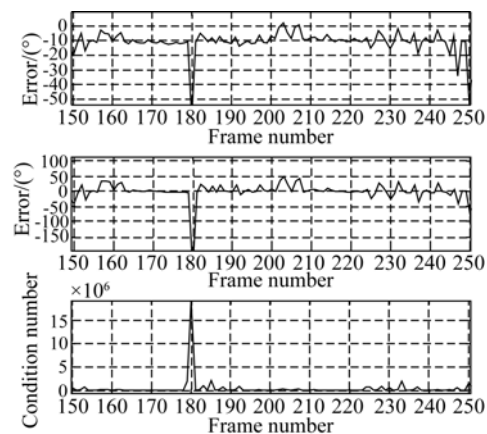


图 8 4 颗参考星定位待测空间目标的结果

Fig. 8 Positioning results of measured space objects with 4 reference stars

由图 8 可以看出,当条件数存在较大波动时(如参考星分布近似直线或参考星相距很近),待测空间目标的定位结果会有较大的变化。因此,在定位待测空间目标时,应尽量选择视场中均匀分布的参考星。在此基础上,可以通过增加参考星的数目进行平差,以提高定位精度。

4 结 论

本文提出了一种基于地平式光电测量设备实现空间目标定位的方法,定位时要求图像中至少包含 3 颗已知的参考星。借助于天文定位三角形和星图识别,该方法大大提高了星图识别的速度

和准确度,能够实时建立图像中星像点与恒星的对应关系,即获取图像中的背景参考星信息;其通过最小二乘法和已知参考星,依据星像点间的角距离与其对应的待测目标和参考星角距离匹配的关系,来定位空间目标。在定位过程中,考虑到参考星的几何相关性对定位精度的影响,应尽量选择均匀分布的参考星。由于采用相对定位方式,定位参考基准与空间目标在同一坐标系,不涉及坐标系转换问题,并且定位过程不受设备调平、轴系、大气折射等误差的影响,定位精度得到很大提高。

本定位方法中,星图识别作为建立星图中星像点与恒星对应关系的工具,可以使用各种改进的算法,本文对此不做重点讨论。

参考文献:

- [1] 李颖,张占月,方秀花. 空间目标监视系统发展现状及展望[J]. 国际太空,2004,6:28-32.
- LI Y, ZHANG ZH Y, FANG X H. The development and prospect of space object surveillance system [J]. *Space International*, 2004, 6: 28-32. (in Chinese)
- [2] 赵铭. 天体测量学导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006, 246-260.
- ZHAO M. *Introduction to Astrometry*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2006, 246-260. (in Chinese)
- [3] 杨少华,郭明安,李斌康,等. 百万像素电子倍增 CCD 数字化相机的设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12):2970-2976.
- YANG SH H, GUO M A, LI B K, *et al.*. Design of digital EMCCD with mega pixels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2970-2976. (in Chinese)
- [4] 何家维,何昕,魏仲慧,等. 电子倍增 CCD 星相机的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(6):1396-1403.
- HE J W, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Design of EMCCD cameras for star detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1396-1403. (in Chinese)
- [5] 郑万波. 基于星敏感器的全天自主分层星识别算法研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2004.
- ZHENG W B. *Fully Autonomous Layered Star Identification Algorithm Research Based-on Star Sensor* [D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, fine Mechanics and Physics), 2004. (in Chinese)
- [6] 张磊,何昕,魏仲慧,等. 快速全天自主星图识别[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(4):909-915.
- ZHANG L, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Fast all-sky autonomous star identification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 909-915. (in Chinese)
- [7] 张少迪,王延杰,孙宏海. 三角剖分以及径向基函数神经网络在星图识别中的应用[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2):395-402.
- ZHANG SH D, WANG Y J, SUN H H. Application of triangulation and RBF neural network to star pattern recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):395-402. (in Chinese)
- [8] 巴甫洛夫. 球面三角学[M]. 刘亚星,译. 北京:商务印书馆,1953,10.
- PAVLOV. *Spherical Trigonometry* [M]. LIU Y X, translation. Beijing: The Commercial Press, 1953, 10. (in Chinese)
- [9] 赵学颜,李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京:装备指挥学院, 2001.
- ZHAO X Y, LI Y CH. *Optical Measurement in Shooting Range* [M]. Beijing: The Academy of Equipment Command & Technology, 2001. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] KOSIK J C. Star pattern identification aboard an inertially stabilized spacecraft [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1991, 14(2): 230-235.
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004, 7.
- FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. BeiJing: China Machine Press, 2004, 7. (in Chinese)
- [13] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
- CHENG Y P. *Matrix Theory* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University press, 2000. (in Chinese).

作者简介:



张磊(1982-),男,吉林松原人,博士,副研究员,主要从事数字图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail: zlxrl@tom.com



何昕(1966-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com