

一种多主星模型的多视场星图识别方法

金 杰¹, 谢俊峰^{1,2}, 李 响¹

(1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048)

摘 要:甚高精度星敏感器往往需要小视场、大面阵以确保较高的角分辨率,然而视场小容易导致星图识别可靠性降低。针对多视场甚高精度星敏感器,本文提出了一种多主星模型的多视场星图识别方法。该方法首先以某一视场星敏感器为基准,利用星敏感器之间的相对安装关系,将其他视场星敏感器探测到的星点转换到基准坐标系下的矢量,然后在每个视场中各自确定一个主星,以主星为基准,利用角距信息,星等信息作为识别标识,构造多个基准三角形模型,利用分段拟合的查找方式,实现多个视场联合星图识别。以高分七号卫星国产双视场星敏为对象,利用下传的原始星图进行试验,结果表明,相对于传统多视场星图识别算法而言,本文所提出的星图识别方法识别率达到99.6%,可靠性更好。

关键词:星图识别;多视场;安装关系;基准三角形;分段拟合

中图分类号:P237;TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.022

A multi-FOV star recognition method based on multi-master stars model

JIN Jie¹, XIE Jun-feng^{1,2}, LI Xiang¹

(1. School of Surveying and Geographical Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, MNR, Beijing 100048, China)

Abstract: High precision star sensors often need small field of view (FOV) and large array to ensure high angular resolution. However, small field of view tends to reduce the reliability of star recognition. A multi-FOV star recognition method based on multi-master star is proposed for multi-FOV high precision star sensors. This method first uses a FOV star sensor as a reference, and uses the relative installation relationship between the star sensors to convert the star points detected by other FOV star sensors into a vector in the reference coordinate system, and then determine a master star in the FOV, use the master star as the reference, use the angular distance information and the magnitude information as the recognition marks, construct multiple reference triangles. The search method of piecewise fitting is used to realize the star recognition of multi-FOV. Taking the Gaofen-7 satellite's domestic dual-FOV star sensors as the object, the original star image downloaded was used for the experiment. The results show that, compared with the traditional multi-FOV star recognition algorithm, the recognition rate of the star recognition method proposed in this paper reaches 99.6%, and the reliability is better.

Keywords: star recognition; multi-FOV; installation relationship; reference triangles; piecewise fitting

基金项目:国家自然科学基金(No. 41571440; No. 41771360; No. 41971426);北京金桥工程种子基金(No. ZZ19013);十三五航天预研项目(No. D040105, D040106);重点研发计划(No. SQ2019YFE020224);高分测绘应用示范项目二期(No. 42-Y30B04-9001-19/21)资助。

作者简介:金 杰(1995-),男,硕士研究生,主要从事精密定姿方向研究。E-mail:jn_j163yx@163.com。

通讯作者:谢俊峰(1981-),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事卫星姿态、激光数据处理与应用等方面研究。E-mail:junfeng_xie@163.com

收稿日期:2020-09-02

1 引言

星敏传感器具有可靠性好、精度高、自主性强的优点,是高分辨率遥感卫星姿态控制的重要控件^[1-3]。随着遥感卫星对无控制几何定位精度要求提升,甚高精度星敏重要性日益凸显^[4]。对于甚高精度星敏传感器而言,若想保证角分辨率足够高,对视场角的选取不宜过大,这样就导致星图中恒星的数量有限,当局部区域出现恒星数量过少,会对实时定姿的精度造成影响,无法提供准确的姿态信息。而多个星敏传感器联合进行星图识别,可以使得这一问题得以解决,提高星图识别的可靠性,同时可以提高飞行器定姿精度^[5-6]。高分七号是我国首颗亚米级立体测图卫星,于2019年11月3日发射,用于开展1:1万立体测图^[7]。星上采用两台国产双视场星敏传感器,视场大小均为 $8.9^\circ \times 8.9^\circ$,面阵大小为 2048×2048 像素,小视场、大面阵的星敏传感器可以确保拥有较高的角分辨率,同时多个视场保证了星图识别的可靠性,为卫星提供高精度姿态数据。

目前绝大多数的星敏传感器星图识别算法均采用的是单一星敏传感器,对于单视场星敏传感器而言,星图识别算法主要划分为两种类型^[8-9],子图同构与模式识别。子图同构类算法主要是利用恒星的星等信息以及恒星之间计算出的角距信息,把恒星星点视为顶点,将恒星构成三角形或者多边形的模式,以此进行星图识别。其中经典算法有三角形算法^[10-11]、匹配组算法^[12-13]等。模式识别类算法本质就是对每颗恒星进行特征构造,生成一个唯一的特征“星模式”,利用这个“星模式”在导航星表中寻找相似导航星,其中经典算法有栅格算法^[14]、基于统计特征的识别算法^[15]。以上算法在用于多视场星敏传感器的星图识别时,由于视场角较小,视场内的观测星数量不能得到保证,并且较小的视场角会对星特征的构建产生影响,因此,传统的基于单视场的星图识别算法不完全适用于多视场星敏传感器。

针对多视场星敏传感器星图识别方法研究的公开资料较少,尤政^[16]等人公开了一种双视场星敏传感器,射入两个视场的光线通过一个半透半反的平面镜,将光线进行透射以及反射,使其成像在同一个CCD上,利用光线之间的角度关系进行星图识别。这种方法仅适用于多视场观测星成像在同一星敏传感器的情况下,并且光线经过透射与反射,势必会对观测星亮度

造成影响。王昊京和吴亮^[17]等人采用三角形算法优先对视场内恒星进行星图识别,若识别结果小于三颗星,才联合其他视场的恒星进行视场间星图识别。熊雪^[1]等人以三视场为例,提出了一种多视场三角形星图识别算法,该算法采用图像拼接的方式,采用基于径向特征的方式,将同一时刻三个视场采集的星图进行拼接,生成一个广视场角的拼接后星图,对拼接后的星图进行三角形识别。该方法具有局限性,若多视场星敏传感器光轴夹角较大,同一时刻生成的多帧星图无重叠图像,则无法完成对星图的配准与拼接。姜笛^[18]等人提出了一种基于最优路径的多视场星图识别方法,该方法首先需要将星图进行融合,若不同视场生成的星图无重叠部分,同样无法进行星图的融合,因此,该方法也具有局限性。

通过以上分析,发现目前已有的多视场星图识别算法均对星敏传感器之间的安装结构有着一定的要求,因此均存在着一定的局限性。因此,本文提出了一种多主星模型的多视场星敏传感器星图识别方法,该方法不受视场间光轴夹角的限制,即使不同视场在同一时刻生成的星图无重叠部分,依旧可以对多视场联合进行星图识别,识别过程中,在利用星等信息的同时,引入距离信息构造出多主星模型,具有更高的可靠性。

2 多视场星矢量坐标转换

2.1 多视场星敏传感器模型

多视场星敏传感器可以在同一时刻拍摄不同天区的恒星,获得更多的恒星信息,覆盖区域更广,有效地解决了单视场星敏传感器若想提高角分辨率,则必然需要舍弃观测星数量这一问题。同时,多视场获取的恒星位置更加分散,具有更高的稳定性与可靠性,求解的姿态信息精度更高。多视场成像原理如图1所示。

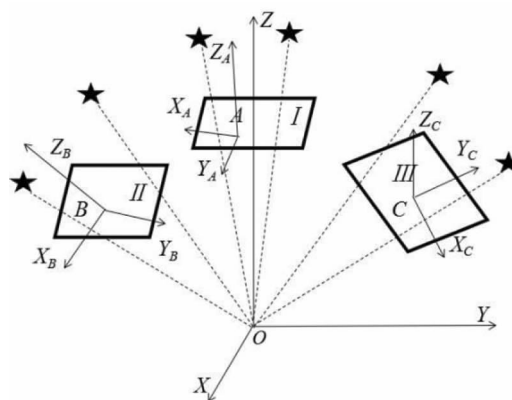


图1 多视场成像模型

Fig. 1 Multi-FOV imaging model

2.2 星矢量坐标转换

多个星敏在同一时刻获得多帧不同的星图,经质心提取后,可以获得多帧星图中的恒星位于各自的像平面坐标系下的坐标。若想进行视场间星图识别,需要多帧星图中的星像坐标位于同一坐标系下,否则无法直接求取视场间恒星的角距信息,这里以一个星敏传感器作为基准,设为 $1a$,将其余星敏传感器下的像点坐标转换到 $1a$ 像平面坐标系下。

假设在某一时刻下, $1a$ 拍摄星图中某一恒星像点坐标为 (X_a, Y_a) , 利用式(1)将恒星像点坐标转换为空间坐标, 并进行矢量化处理, 其余视场恒星同理:

$$W_a = \begin{bmatrix} -(X_a - X_0) \\ -(Y_a - Y_0) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{(X_a - X_0)^2 + (Y_a - Y_0)^2 + f^2}} \quad (1)$$

其中, (X_0, Y_0) 为星敏传感器透镜中心在像平面下的坐标; f 为星敏传感器透镜角距。

求得所有视场恒星在像空间坐标系下的矢量后, 根据两个星敏传感器之间的安装关系以及光轴夹角信息, 可以求得矢量之间的旋转矩阵, 将其余视场矢量左乘与 $1a$ 视场的旋转矩阵, 即可得到其余视场在 $1a$ 坐标系下的矢量信息, 如式(2)所示:

$$W_{12} = A \cdot W_2 \quad (2)$$

其中, A 为旋转矩阵; W_2 为其余星敏传感器坐标系下的恒星矢量; W_{12} 为其余视场恒星在 $1a$ 坐标系下的恒星矢量信息。

3 多主星模型的多视场星图识别方法

本算法首先选取多个视场中的最亮星为主星, 通过匹配中心星概率的方法^[19]对主星进行识别, 即: 计算主星与同一视场下其余所有星像点之间的星间角距, 利用星间角距信息与导航星库中存储的角距值做对比, 若角距差值小于匹配门限, 则记录导航星信息, 同时记录相同星号出现的次数, 当完成匹配后, 出现次数越多的星号越有可能是主星星号, 由此得到多颗主星的主星候选星。主星确定后, 选取主星中最亮的三颗星构成星等三角形模型。由于星等信息本身具有不稳定性, 仅靠星等信息识别出来的结果的可靠性不好, 而

距离信息的可靠性强, 因此, 在构造星等三角形的基础上, 再以距离信息, 构造距离三角形, 采用距离信息与星等信息联合的模式进行星图识别, 使得识别结果具有更好的可靠性。多主星模型构造完成后, 在主星模型的基础上, 对其余副星(剩余未进行识别的星)进行识别。匹配识别的过程中, 索引方式采用分段直线拟合的方法。

3.1 构建特征星库

特征星库作为星图识别的依据, 对识别可靠性以及效率问题产生直接的影响, 是星图识别中重要的一部分。多视场特征星库的构建方法与单视场有所不同, 多视场存在视场间恒星识别以及视场内恒星识别。当进行视场内星图识别时, 视场内星间角距值范围应为 $(0, FOV)$ 。若两个星敏传感器光轴之间夹角为 θ , 当进行视场间星图识别时, 视场间星间角距值范围应为 $(\theta - FOV, \theta + FOV)$ 。若按视场内特征星库的构建方法来构建视场间特征星库, 则视场间特征星库会包含大量的冗余信息, 给匹配识别效率造成很大的影响。因此, 本文在构建视场间特征星库时, 利用两个星敏传感器之间的安装矩阵, 以及星点信息估计视轴指向^[20]。利用视轴指向定位天区。同时, 为了减少特征星库大小, 在构建时, 只保留两个星序号信息以及角距信息, 并且将求取的角距值扩大 1×10^8 , 存储为整形。

3.2 匹配识别

1) 确定主星。恒星的亮度信息是判断该恒星是否可以被星敏传感器探测到的一个重要信息, 原则上来说, 在一帧星图中, 越亮的星可靠性越高。因此, 本文算法首先对每个视场中的恒星按照星等信息进行排序, 选取视场中最亮的星作为待识别的主星。

2) 主星匹配。计算主星与其余同一视场下所有星像点之间的星间角距, 将角距值与星号信息保存。利用索引方式, 将角距值与导航星库中存储的角距值进行匹配, 若二者角距差值小于匹配门限, 则记录导航星信息, 并给予导航星一个标识 $count$, 初始值设定为 0, 用以记录该星号出现的次数。在匹配的过程中, 同一导航星重复出现, 则 $count$ 加 1。当完成匹配后, 出现次数越多的星号, 即设定的标识 $count$ 值越大的星号, 越有可能是主星星号, 由此得到主星候选星。由于导航星库中存储的星间角距集

数量较多,二分查找会导致匹配效率低下,并且星间角距与序号之间的关系并非严格意义上的直线关系,k-vector 查找法也不完全适合与多视场视场间恒星的匹配识别,因此,本文索引方式采用的是分段直线拟合的方法。

如图2所示,将星间角距组按照 1° 进行划分,然后分段对星间角距与序号的关系进行直线拟合,粗实线和虚线交替分别表示不同段。具体公式如(3)式所示, a_i, b_i 分别表示第 i 段星间角距组的系数。基于拟合的结果,查寻结果更精确可靠。

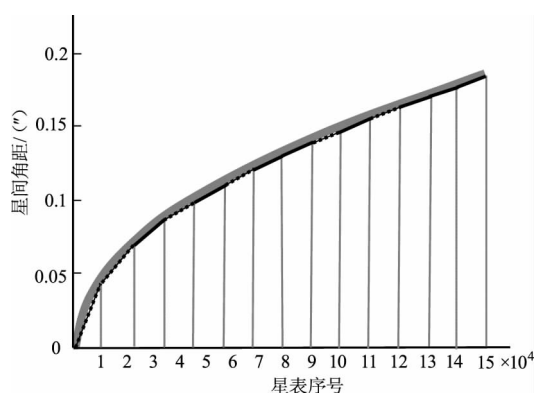


图2 星间角距与星表序号的关系

Fig. 2 Relationship between angular distance and index

$$y = \begin{cases} a_0x + b_0, (0 < y < 1) \\ \dots \\ a_ix + b_i, (i-1 < y < i) \\ \dots \end{cases} \quad (3)$$

3) 利用星等信息构建主星模型。若视场数为2,则以两颗主星为基准,构造星等三角形。选取除两颗主星以外的次亮星作为第三颗星,与主星候选星对组成三角形,生成候选星等三角形。若视场数大于2,则以最亮的三颗主星为基准,构造星等三角形。

4) 利用距离信息,构造主星模型。构造距离三角形时,由于 $1a$ 中恒星像点没有经过旋转矩阵的转换,因此以 $1a$ 星敏感器中的主星为中心,确定两个半径 R 与 r ,在 R 与 r 之间选取距离中心星最近的两颗星,生成距离三角形。图3所示为视场数为2时,构造的主星模型示意图。其中, a 与 b 为两颗主星, Δabc 为星等三角形, Δade 为距离三角形。若视场数大于2,星 c 应为第三个视场的主星。由此,则完成

了阶段性星图识别。

5) 副星识别。将剩余的所有副星分别与已识别的星相连,计算星像点角距,将满足与已识别星星间角距差值小于匹配门限的星视为候选星,记录下所有的候选星星对信息,若满足星序号限制条件,则认为是正确的匹配结果,索引方法同样采用分段拟合查找法。副星匹配示意图如图4所示。

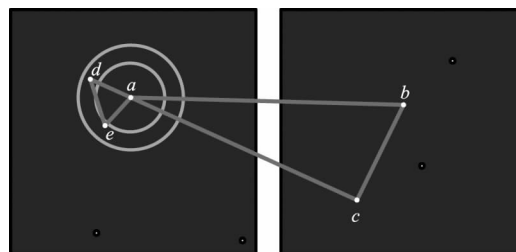


图3 构造多主星模型

Fig. 3 Construct multi-master star model

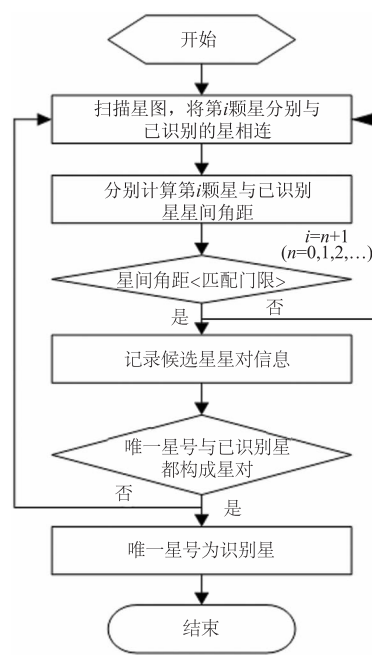


图4 副星匹配流程图

Fig. 4 Flow chart of remaining star matching

4 实验分析与验证

4.1 实验条件

基于现有算法进行分析和归纳,选用目前识别率与可靠性较高的基于匹配概率中心星的星图识别算法^[19]与李葆华等人^[21]的一种将角距和作为特征进行识别的多视场星敏感器的星图识别算法作为对比,利用高分七号在轨测试数据分别对这两种算法和本文提出算法的识别性能以及识别效率进行实验

对比分析。

实验采取的基本星表为 Hipparcos, 主要用到的信息有星序号、赤经、赤纬以及星等信息。高分七号配备的星传感器视场大小为 $8.9^\circ \times 8.9^\circ$, 面阵大小为 2048×2048 像素, 星等选取的范围为 $(0, 6.5)$, 共 8669 颗星, 剔除双星以及变星后, 剩余 8450 颗星构成基本星表, 实验数据选取高分七号星敏传感器下传的星图数据, 共计十轨, 2141 帧星图。图 5 为高分七号星图数据。

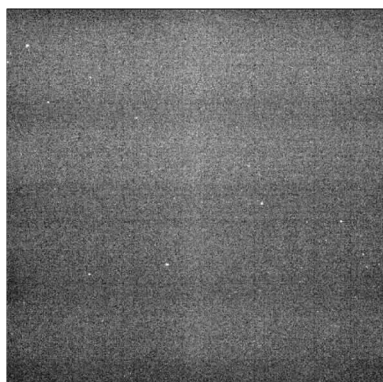


图 5 高分七号星图数据

Fig. 5 Star image of GF-7

4.2 实验结果与分析

4.2.1 识别结果正确性验证

为了确定本文算法星图识别结果的正确性, 利用十轨数据的星图识别结果分别计算拍摄时刻星敏感器的姿态信息。以 768 轨数据为例, 给出定姿结果。姿态四元数如图 6 所示, 横轴为星图帧数, 纵轴代表四元数 q 值, q_0 为标量, $q_1 \sim q_3$ 为矢量。

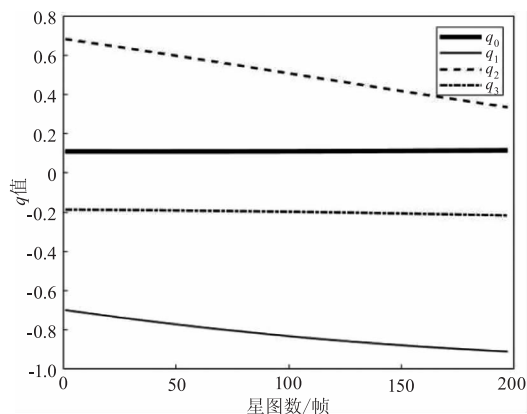


图 6 姿态四元数

Fig. 6 Quaternion

4.2.2 识别率对比及分析

对选取的十轨高分七号在轨测试星图数据分别

采用基于匹配概率中心星的星图识别算法、李葆华等人提出多视场星图识别算法及本文提出的算法进行星图识别, 三种算法的识别率如图 7 所示, 其中横坐标为轨道号, 纵坐标代表识别率。实验共计 2141 帧星图, 其中, 本文算法正确识别的星图数为 2133 帧, 识别率达到 99.6%。

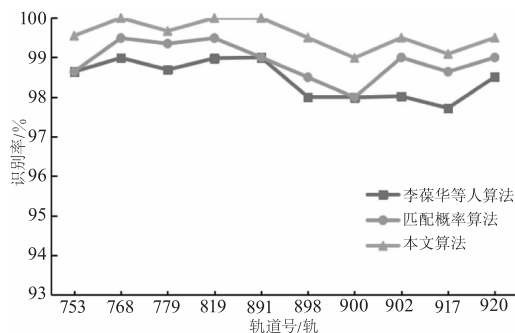


图 7 识别率对比

Fig. 7 Recognition rate comparison

通过对三种算法识别率的对比, 在十轨数据的对比实验中, 三种算法中本文算法识别率最高。对三种算法识别结果逐帧星图进行分析比较, 在三种算法均成功识别的前提下, 本文算法识别出的星数目更多, 可靠性更高。

为了探究影响多视场算法识别率的因素, 从 10 轨数据中选取一轨数据进行深入分析。以 2019 年 12 月 24 日拍摄的 768 轨数据为例, 该轨共 198 帧星图, 其中, 以第 3 帧星图为例, 多视场三种算法识别的结果如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 本文算法识别结果

Tab. 1 The results of algorithm recognition of proposed

序号	赤经	赤纬	像点 x	像点 y
3841	157.47701	65.626404	869.281	15.4795
3846	157.61099	64.257698	814.245	326.77
3905	160.451	68.443604	705.721	-668.525
3907	160.48599	65.7164	589.675	-49.4339
4011	165.274	63.421101	12.8277	363.646
4151	173.08701	61.0825	-952.264	614.449
4215	175.619	66.744904	-680.808	-689.562
4846	206.74899	38.542599	-9062.39	2068.61
4872	207.948	34.444099	-10436.1	2710.16
4965	212.813	32.295799	-12098.1	2239.02
4994	214.101	39.744598	-9915.6	595.059

表2 匹配概率中心星算法识别结果

Tab.2 Matching probability center star algorithm recognition result

序号	赤经	赤纬	像点 x	像点 y
3846	157.61099	64.257698	814.245	326.77
3905	160.451	68.443604	705.721	-668.525
3907	160.48599	65.7164	589.675	-49.4339
4215	175.619	66.744904	-680.808	-689.562
4846	206.74899	38.542599	-9062.39	2068.61
4872	207.948	34.444099	-10436.1	2710.16
4965	212.813	32.295799	-12098.1	2239.02

表3 文献[21]算法识别结果

Tab.3 Algorithm recognition result of literature[21]

序号	赤经	赤纬	像点 x	像点 y
3907	160.48599	65.7164	589.675	-49.4339
4846	206.74899	38.542599	-9062.39	2068.61
4872	207.948	34.444099	-10436.1	2710.16

由表1、表2、表3结果可知,本文算法成功识别的星为11颗,匹配概率中心星算法成功识别的星为7颗,李葆华等人算法只识别出三颗主星,本文算法识别效果更好。三种算法均选用最亮星作为主星,最亮星为1b视场中的星,转换后的像点为-10436.1,2710.16,成功识别后对应的导航星库中的星号为4872。在此基础上,本文算法选取的另一颗主星为1a视场中的最亮星,像点为589.675,-49.4339,成功识别后对应的导航星库中的星号为3907。以星等为特征构建星等三角形,三颗星号分别为4872、3907与4846,以距离作为特征构建的三角形三颗星号分别为3907、3841、3846。该帧星图中,出现了主星过亮的情况,即当星的亮度达到一定程度后,星等信息反而会对识别结果造成负面的影响,同时,针对高分七号数据来说,当星过亮时,星图数据会出现亮点灰度值饱和现象,也会对星图识别结果造成影响。匹配概率算法以及李葆华等人算法均仅在此最亮星的基础上进行其余副星识别,这是造成星图识别结果不理想的主要原因。而李葆华等人算法三颗主星均为按照星等亮度选取的,因此造成了识别星数量低于匹配概率算法。同时,导致匹配概率算法以及李葆华等人算法识别失败的原因,也同样是此因素导致。而本文算法在引入星等信息的同时,又引入了距离信息,因此更好地保证了

识别率。

5 结论

本文针对目前已有多视场算法的局限性,提出了一种多主星模型的多视场星图识别方法。该方法利用星敏感器之间的安装关系,将其他视场星敏感器探测到的星点转换到基准坐标系下的矢量,使得多个视场内的星点信息可以联合进行识别。在匹配识别的过程中,提出了引入星等信息的同时,加入距离信息的模式,使得本文方法具有更高的恒星识别率,根据实验结果来看,本文所提出的星图识别方法识别率达到99.6%,具有更好的可靠性。

参考文献:

- [1] Xiong Xue, Wang Qing. An improved triangle star identification method based on multi-FOV star sensor[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(1): 225 - 228. (in Chinese)
熊雪,王庆. 基于多视场星敏感器的三角形星图识别方法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(1): 225 - 228.
- [2] Duan Yuheng, Guan Liang. High precision attitude measurement and calibration method of spacecraft based on precision star sensor[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(11): 1 - 5. (in Chinese)
段宇恒,管亮. 基于精密星敏感器的航天器高精度姿态测量标定方法[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 1 - 5.
- [3] Li Pin. Star map processing technology research of APS star sensor[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017. (in Chinese)
李品. APS星敏感器星图处理技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [4] Sun Long, Cai Jianan, Jiang Jianhua. Star identification algorithm based on the small FOV star tracker[J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(12): 71 - 74. (in Chinese)
孙龙,蔡佳楠,姜建华. 小视场星敏感器的星图识别算法[J]. 电子科技, 2017, 30(12): 71 - 74.
- [5] Zhao Mingyan. Star identification method for three FOVS star sensor[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
赵明艳. 三视场星敏感器星图识别方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [6] Xiong Kun, Wang Chunxi, Wu Yue, et al. Calibration method for multiple FOV star sensors based on three-axis

- turntable[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4):242–247. (in Chinese)
- 熊琨,王春喜,吴跃,等. 基于三轴转台的多视场星敏传感器标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4):242–247.
- [7] Cao Haiyi, Dai Jun, Zhang Xinwei, et al. Study on the development approach of GF-7 high precision optical stereo mapping satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(2):17–28. (in Chinese)
- 曹海翊,戴君,张新伟,等. “高分七号”高精度光学立体测绘卫星实现途径研究[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(2):17–28.
- [8] Padgett C, Kreutz-Delgado K, Udomkesmalee S. Evaluation of star identification techniques[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 1997, 20(2):259–267.
- [9] Padgett C, Kreutz-Delgado K. A grid algorithm for autonomous sar identification[J]. *Ieee Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(1):202–213.
- [10] Cole C L. Fast star pattern recognition using spherical triangles[D]. Buffalo, NY: State University of New York at Buffalo, 2004.
- [11] Wu Feng. Study on the key technologies for autonomous star sensors[D]. Suzhou: Soochow University, 2012. (in Chinese)
- 吴峰. 自主导航星敏传感器关键技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.)
- [12] KosiK J. Star pattern identification aboard an inertially stabilized apacecraft[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2013, 14(1):230–235.
- [13] Zhang Guangjun. Star identification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- 张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011
- [14] Qian Huaming, Sun Long, Cai Jianan, et al. An extended grid algorithm in star identification field[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(2):110–116. (in Chinese)
- 钱华明,孙龙,蔡佳楠,等. 星图识别的一种扩充栅格算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(2):110–116
- [15] Udomkesmalee S, Alexander J, Tolivar F. Stochastic star identification[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1994, 17(6):1283–1286.
- [16] You Zheng, Xing Fei, Dong Ying. Double-FOV star sensor and the method of star recognition[P]. CN1609549, 2005–04–27. (in Chinese)
- 尤政,邢飞,董瑛. 双视场星敏传感器及利用其进行星图识别的方法[P]. CN1609549, 2005–04–27.
- [17] Wang Haojing. Study on celestial navigation by three fields of view star recognition[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of optics, precision machinery and Physics), 2012. (in Chinese)
- 王昊京. 三视场恒星识别天文导航方法研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [18] Jiang Di, Zhang Ke, Debeir Olivier. All-sky autonomous star recognition for Multi-FOV star sensors based on optimal path[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(1):153–158. (in Chinese)
- 姜笛,张科,Debeir Olivier. 基于最优路径的多视场全天自主星图识别[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(1):153–158.
- [19] Xie Junfeng. The critical technology of data processing of satellite attitude determination[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese)
- 谢俊峰. 卫星星敏传感器定姿数据处理关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [20] Gou Bin, Cheng Yongmei, Zhao Mingyan, et al. Multi-Stage star image identification method of three Field-of-View star sensor[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(3):541–546. (in Chinese)
- 苟斌,程咏梅,赵明艳,等. 三视场星敏传感器的多级星图识别算法[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(3):541–546.
- [21] Li B, Sun Q, Zhang T. A star pattern recognition algorithm for the Double-FOV star sensor[J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 2015, 30(8):24–31.