

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905157

分布式星敏感器下空间目标同步关联方法

黄秋实, 张雅声, 冯 飞

(航天工程大学 北京 101400)

摘要:将分布式星敏感器作为空间目标的监视平台,需要将多星敏感器拍摄星图中的空间目标即时关联。星图中的空间目标为没有纹理、颜色等特征的弱小目标,无法利用经典目标关联算法解决。以对极几何约束为关联依据,提出一种分布式星敏感器下空间目标同步关联方法。对极几何约束能够描述多视图的内在射影关系,广泛应用于图像匹配和拼接问题,将其应用于目标关联领域。基于实测数据,进行300组星图的关联实验,统计出空间目标关联概率达90%,验证了算法的可行性,给出了关联门限的合理参考值并分析了造成关联错误的多种原因,基于蒙特卡洛法估算误判最大概率。实验证明本文方法在星敏感器工作中的抖动、测量偏差及少量干扰点的影响下有较理想的关联效果。

关键词:目标关联;星敏感器;弱小目标;对极几何

中图分类号: V443+.5 TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.99

Space target synchronization association method under distributed star sensor

Huang Qiushi, Zhang Yasheng, Feng Fei

(Aerospace Engineering University, Beijing 101400, China)

Abstract: The distributed star sensor can be used as a monitoring platform for space targets. Multiple star sensors are needed to be associated instantly in the star map. The space target in the star map is a small target with no features (e.g., texture and color), which cannot be solved by the classical target association algorithm. Based on the correlation of polar geometry constraints, a space target synchronization association method under the distributed star sensor is proposed. The epipolar geometry constraint can describe the intrinsic projective relationship of multi-views, which has been widely used in image matching and stitching problems. It is applied in the target association field in this study. Based on the measured data, the association experiments of 300 star maps are carried out. The space target association probability can reach 90% and the feasibility of the algorithm is verified. The reasonable reference value of the associated threshold is proposed and various causes of the association error are analyzed. Monte Carlo is adopted to estimate the maximum probability of misjudgment. Experimental results show that the proposed method has an ideal association effect under the influence of jitter, measurement deviation and several interference points in the operation of the star sensor.

Keywords: target association; star sensor; small target; epipolar geometry

0 引 言

随着卫星数量及空间碎片的增多,拥有强大的空间态势感知能力有助于各国在太空博弈中获得主动权,对国家发展至关重要。空间目标监视系统是空间态势感知的重要部分。相比于地基光学系统,天基光学系统不受大气的干扰,在监视能力、设备复杂度、观测时间等方面

具有优势,在空间目标监视系统中具有重要地位^[1]。星敏感器是以恒星为参照系,以星空为工作对象的高精度空间姿态测量装置,其核心是光学成像系统,具备拍摄空间目标的能力,我国在轨卫星数目多,并且星敏感器在现有卫星上普及率高,可应用于空间目标监视^[2]。

单台星敏感器拍摄的星图,只能得到空间目标相对于星敏感器的方向而无法确定距离,将多台星敏感器同一时刻拍摄星图中的公共目标进行关联,借助不同观测

几何可实现对空间目标的定位,继而进行空间目标定轨,可弥补我国空间目标监视能力的不足,不必发射专用监视卫星,节约卫星组网成本。冯飞等^[3]提出的一种改进的分布式星敏传感器同步定轨方法的前提是对空间目标进行关联和编目。本文要解决的问题紧贴此应用背景,旨在实现多星敏传感器下多空间目标的同步关联。

当前目标关联算法的主要依据是基于位置信息和基于属性信息,星图背景下的目标表征是宽度为几个像素的明亮圆斑,无法体现形状、纹理、颜色等细节特征,因此基于属性信息的算法不适用于此问题。基于位置信息的目标关联方法更为成熟,经典的算法有最邻近算法(nearest neighbor, NN)、概率数据关联算法(probabilistic data association, PDA)以及联合概率数据关联(joint probabilistic data association, JPDA)^[4]。但是以上算法需要传感器连续观测以获取目标的运动特性,如位置、速度、方位等,且关联的对象大多为同一传感器下的目标^[5],不能满足本文问题中的不同传感器下的目标关联以及同步关联的两大要素。本文为多传感器下的目标同步关联提供了一种新颖的思路,即利用对极几何约束实现目标关联^[6]。

本文思路来源于多传感器对空间目标成像的几何构型与双目视觉类似。差别在于图像匹配是通过大量特征点的匹配确定是否为同一目标,此问题中仅将空间目标质心一点的像素坐标作为目标关联的依据。

对极几何约束能够描述2幅视图之间内在射影关系,与外部的场景无关,取决于相机内参数和2相机的位置及姿态,是多视图几何理论的基础^[7],可用于匹配同一场景2幅图像之间的对应点,广泛用于解决双目视觉中的图像匹配和拼接。在研究的过程中对比了其他图像匹配算法,如基于灰度的模板匹配算法、边缘特征算法、点特征算法^[8],由于星图中的空间目标的像点无法体现特征故无法应用上述算法。因此本文以对极几何约束原理实现多星敏传感器下空间目标的同步关联。

我国目前有处于研创阶段的小视场、高极限星等的新型星敏传感器可满足本文的空间目标监视的要求^[9]。由于可视星等的提升,此类星敏传感器拍摄的星图中暗星数目增加,提高了空间目标的关联难度,应用本文算法前需对空间目标进行提取,排除恒星、噪点的干扰^[10]。

1 理论分析

1.1 问题描述及可行性分析

在工程中星敏传感器的任务以定姿为主,空间目标监视为辅,星敏传感器的拍摄时机和拍摄区域具有随机性,且散布在太空的各个位置,各星敏传感器之间相隔甚远因此称之为分布式。目标在星敏传感器的视场只能短暂停留,因此本

文的目标关联在应用背景上区别于以往的目标跟踪关联算法,导致经典的目标关联算法如最邻近算法、概率数据关联算法、联合概率关联算法无法满足此应用背景。

分布式星敏传感器对空间目标观测的几何构型与多目视觉中对极几何构型类似,对极几何约束广泛应用与图像匹配与拼接,可用于多角度观测图像中所有特征点的配对。空间目标在星图上表征为宽度仅几像素的明亮圆斑,将每个目标的像的质心抽象为待匹配的特征点,将多星图中的目标关联问题转换为特征点的匹配问题。

本文目标关联问题不同于传统目标关联问题的2个特点为同步关联和多传感器关联。空间目标在多星敏传感器星图上的坐标之间仅有的关系即为空间目标在多星敏传感器下的射影几何关系,因此对极几何约束为解决此问题的重要突破,并且能够利用我方卫星数据实现相机标定及基础矩阵的求解。无需连续跟踪即可同步关联多台星敏传感器星图中的目标,是对极几何约束方法的最大优势。

图1所示为对极几何, P 是空间中一点, O_1 和 O_2 是相机的光心,连线称为射影基线(base line), P 点在 O_1 相机坐标系下的空间坐标为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$,对应的像点 p_1 的像素坐标是 $p_1(u_1, v_1, 1)$, P 点在 O_2 相机坐标系下的空间坐标为 $P_2(x_2, y_2, z_2)$,对应的像点 p_2 的像素坐标是 $p_2(u_2, v_2, 1)$ 。 p_1, p_2 本身为二维平面的像素坐标,为实现三维空间坐标运算,第三维值为1。

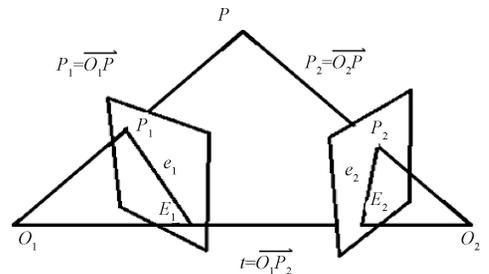


图1 对极几何约束

Fig.1 Epipolar geometry constraint

E_1 和 E_2 为 O_1O_2 所在直线与2成像面的交点,称为对极点(epipoles)。

e_1 和 e_2 表示 p_1E_1 和 p_2E_2 所在直线,被称为对极线(epipolar line)。

p_1 必位于 e_1 上, p_2 必位于 e_2 上,称此约束为对极线约束^[11]。

$$p_2^T F p_1 = 0 \quad (1)$$

式中: F 为 3×3 的基础矩阵,可根据相机的内外参数求得。

1.2 空间目标同步关联方法

- 1) 保存所有空间目标质心在各星图中的像素坐标;
- 2) 将任意2张不同的星图作为关联的组合;

当处理同一时刻,由 N 台星敏传感器拍摄的 N 张星图时,需要进行 C_N^2 组星图间的关联。

3) 根据星敏传感器所在卫星的轨道和姿态数据以及相机内部参数,计算每一组中 2 幅星图之间的基础矩阵 F 。

工程中求解基础矩阵的经典方法是根据多组对应点像素坐标,利用 8 点法估计图像间基础矩阵^[12],由于本文所述问题中对应点的关系未知,无法用基础矩阵估计法求解,本文通过式(2)解算星敏传感器 1 到星敏传感器 2 的基础矩阵,各星敏传感器的数据需按顺序代入^[13]。

$$F_{1-2} = M_2^{-T} R_{1-2} S_{1-2} M_1^{-1} \quad (2)$$

式中: R_{1-2} 代表星敏传感器 1 相机坐标系到星敏传感器 2 相机坐标系的旋转矩阵,为正交矩阵,可由星敏传感器 1 相机坐标系先逆向旋转到参考坐标系,再由参考坐标系转到星敏传感器 2 相机坐标系。

$$R_{1-2} = r_2 * r_1^{-1} \quad (3)$$

$$r = \begin{bmatrix} \cos Y & \sin Y & 0 \\ -\sin Y & \cos Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos P & 0 & -\sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & \sin R \\ 0 & -\sin R & \cos R \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r 矩阵代表参考坐标系到相机的旋转矩阵; Y 、 P 、 R 代表从参考坐标系按 321 轴旋转到相机坐标系的偏航角、俯仰角和滚转角。

式(2)中 S_{1-2} 为星敏传感器 1 到星敏传感器 2 相机坐标系原点的平移矩阵。若 2 相机坐标系原点分别为 O_1 和 O_2 , t 表示 O_1 指向 O_2 的向量 (t_x, t_y, t_z) , 即 O_2 在 O_1 相机坐标下的空间坐标。

$$S_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(2)中 M_1 和 M_2 为 2 台星敏传感器的投影矩阵,代表了其光学相机的内参矩阵。相机内部参数包括星敏传感器作为光学设备的焦距、视场、分辨率。

$$M = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: f 代表相机焦距; dx 、 dy 代表像素的长度和宽度; u_0 、 v_0 为主点像素坐标。当已知相机视场角度 $fov_x \times fov_y$ 及照片分辨率 $N_x \times N_y$ 时, M 还可通过式(7)表示。

$$M = \begin{bmatrix} \frac{N_x}{2 \tan(fov_x/2)} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{N_y}{2 \tan(fov_y/2)} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

4) 对一幅星图中每一个待关联的点,计算另一幅星图中所有点与待关联点对极线的距离。距离在门限之内的点作为关联候选点,直至遍历所有的星图组合;

对于待关联点 p_1 , 满足式(1)的所有点 p_2 构成 p_1 的对极线。在实际中由于误差的存在,关联点会与对极线存在若干像素的距离。

$$\text{若 } F p_1 = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \text{ 则:}$$

$$\frac{|p_2^T F p_1|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \ll L \quad (8)$$

式(8)表示候选关联点到相应对极线的距离小于门限值 L 。 F 、 p_1 已知 a 、 b 、 c 为已知常数, L 取值与关联的准确率有关。取值太小会将真正的关联点排除在外造成漏关联,取值太大会增加候选关联点,增加误关联概率。

5) 当某点有多个关联候选点时,将其与距离对极线最近的点关联并删除其他候选点,保证每点至多只与一点关联;

6) 根据全部星图的关联结果进行汇总。

按照星图排列的顺序,依此将各星图中空间目标质心的像素坐标填入对应的列。新元素若能与某行前几列元素全部关联,判定为同一目标保存在对应列同一行,不能与已知目标进行上述关联的为新目标,保存在新的行中。生成各列代表不同星图,各行代表不同空间目标的关联结果汇总表。

步骤 1)~6) 中所述星图的拍摄时刻相同,且有重叠的视场。原始的星图中除了少数空间目标还包含大量恒星以及噪点。在进行本文算法之前需要进行空间目标的提取,在进行空间目标提取的过程中,可能会将恒星以及噪声误判为空间目标,是算法误差的来源之一。此外星敏传感器的抖动也会导致提取的质心坐标存在误差。由于实际测量中的误差^[14]以及相机畸变参数的存在,在利用上述公式计算 R 、 S 、 M 的结果均会与实际存在偏差。

2 实验

2.1 实验环境及方法

本文通过实测数据和 STK (satellite tool kit) 仿真平台相结合的手段, STK 是航天领域专业的分析软件,功能覆盖航天任务的全过程,且模型经过国内外科研单位,商业航天公司在工程实践中的反复检验,具有可靠性。如图 2 所示,在 2019 年 4 月 1 日 04:00:00 有 4 颗卫星的星敏传感器视场重叠,该区域共有 9 个 GEO (geostationary earth orbit) 空间目标。其中星敏传感器所在卫星轨道的布置借鉴了我国尖兵和遥感系列卫星的轨道设计,轨道根

数如表 1 所示。由于小视场高极限星等的星敏传感器处于研创阶段,因此测量精度、主点及相机畸变系数参照我国一款具有小体积,低功耗特点的 ST-APS2-2 星敏传感器的地面实测数据,其技术指标如表 2 所示。

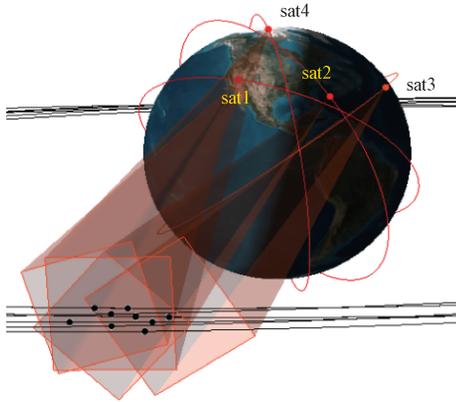


图 2 星敏传感器观测空间目标场景

Fig.2 Scenario of star sensor observation space target

表 1 关联时刻卫星轨道根数

Table 1 Satellite orbits elements at the moment of association

	半长轴/ km	偏心率/ (°)	轨道 倾角/ (°)	升交点 赤经/ (°)	近地点 幅角/ (°)	真近 点角/ (°)
Sat1	6 977. 61	0. 00	34. 97	354. 42	71. 76	39. 773
Sat2	7 470. 86	0. 02	63. 36	328. 65	7. 22	144. 69
Sat3	6 978. 84	0. 00	35. 08	115. 16	83. 19	336. 96
Sat4	6 995. 72	0. 00	98. 096	124. 52	189. 66	234. 47

表 2 星敏传感器技术指标

Table 2 Technical indicators of star sensor

项目	ST-APS2-2	实验星敏传感器
视场/(°)	20×20	2×2°
分辨率	1 024×1 024	512×512
测量精度(X,Y)/(″)	6	6
测量精度(Z)/(″)	40	40
灵敏度/MV	5. 5	13
主点(u ₀ ,v ₀)/pixel	(504. 87,470. 65)	(252. 44,235. 33)
径向畸变系数 p ₁	-4. 85×10 ⁻⁵	-4. 85×10 ⁻⁵
径向畸变系数 p ₂	-1. 45×10 ⁻⁵	-1. 45×10 ⁻⁵
切向畸变系数 q ₁	4. 63×10 ⁻⁵	4. 63×10 ⁻⁵
切向畸变系数 q ₂	-3. 04×10 ⁻⁷	-3. 04×10 ⁻⁷
噪声等效角/(″)	2. 3	2. 3

误差参考星敏传感器 ST-APS2-2 测试数据,对星敏传感器的视线加入 10 mrad 的抖动;对星敏传感器旋转角度数据加入上限为 1' 的随机噪声;我国卫星实时位置偏差在百米以内,对测距数据加入上限为 0. 2 km 的随机噪声;考虑到空间目标提环节可能会将恒星或星图噪点误判为空间目标,向空间目标星图中加入随机伪目标。4 台星敏传感器拍摄的含伪目标的空间目标星图如图 3 所示,框选的目标为添加的伪目标。

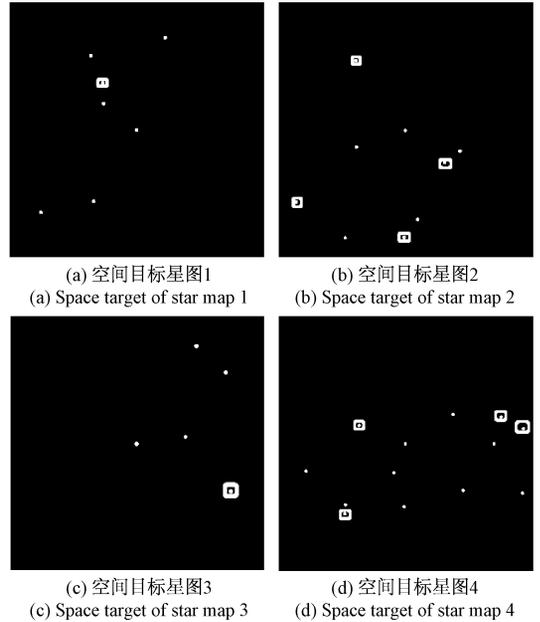
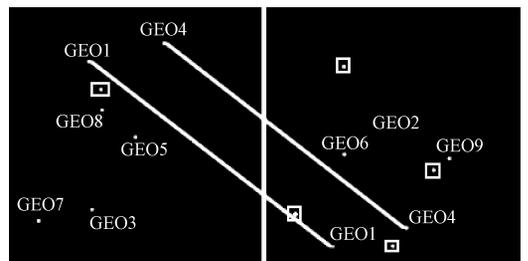


图 3 含空间目标的星图

Fig.3 Star map with space targets

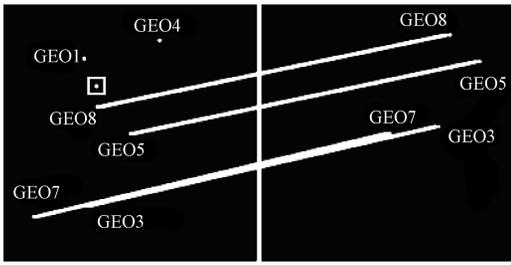
2.2 实验结果与数据分析

关联门限取 10 pixel,标注每张星图中的空间目标用以检验关联结果的正确性。如图 4 所示,以来自 4 台星敏传感器的空间目标星图为例,两两关联将生成 6 张关联结果图,分别对应着图 4(a)~(f),各子图均由 2 张被不同星敏传感器拍摄的星图拼接而成,当左右 2 个像点代表同一空间目标时用线将其连接。

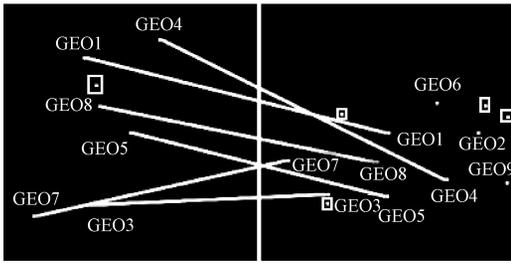


(a) 星图 1 与星图 2 间的目标关联

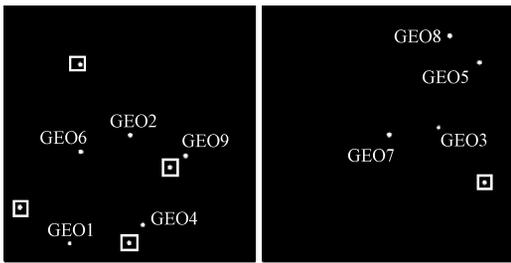
(a) Target association between star map 1 and star map 2



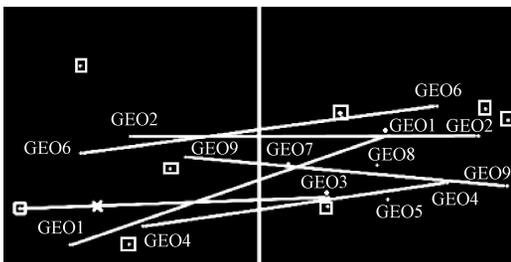
(b) 星图1与星图3间的目标关联
(b) Target association between star map 1 and star map 3



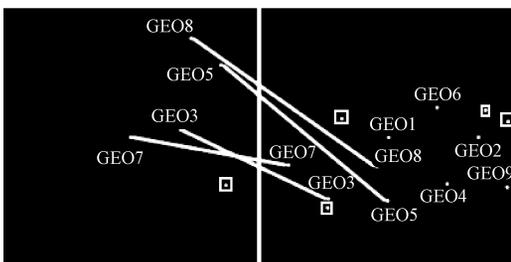
(c) 星图1与星图4间的目标关联
(c) Target association between star map 1 and star map 4



(d) 星图2与星图3间的目标关联
(d) Target association between star map 2 and star map 3



(e) 星图2与星图4间的目标关联
(e) Target association between star map 2 and star map 4



(f) 星图3与星图4间的目标关联
(f) Target association between star map 3 and star map 4

图4 星图间的目标关联结果

Fig.4 Target association result between star maps

空间目标的像素坐标分别保存在矩阵的4列,同行元素来自同一目标,矩阵共9行,与设置的9个空间目标吻合。通过此表可以直观的得到各空间目标在每一张星图上的像素坐标。图4(d)中没有连线,表明星图2和星图3中没有相同空间目标,对应表3中的Star map 2和Star map 3 2列没有位于同一行的元素。图4(e)中,星图2的一个伪目标与星图4的GEO3被判定为关联,据图4(a),(d)该伪目标无法与GEO3在星图1和星图3中的像关联,由此判断此关联是误关联。误关联由对极几何约束的局限性导致。

表3 目标关联结果汇总

Table 3 Summary of target association results

目标	星图			
	Star map 1	Star map 2	Star map 3	Star map 4
GEO1	(164,106)			(255,255)
GEO2		(256,255)		(433,255)
GEO3	(170,398)		(354,241)	(135,377)
GEO4	(313,70)	(280,434)		(371,348)
GEO5	(255,256)		(435,112)	(253,381)
GEO6		(157,289)		(351,196)
GEO7	(64,420)		(254,256)	(56,310)
GEO8	(190,202)		(376,59)	(232,313)
GEO9		(365,297)		(490,354)

对极几何约束的局限性表现为距对极线小于门限值的点均会被判断为候选关联点,而在工程中无法保证距离对极线最近的候选关联点一定是正确的关联点。表4所示为实验中各组关联点到对极线的平均距离,可知,在噪声的影响下多数关联点会偏离对极线更远。

表4 各组关联点到对极线的平均距离

Table 4 The average distance from each group to the epipolar line

	不加噪声/pixel	加噪声/pixel
	图4(a)	1.387
图4(b)	0.796	2.467
图4(c)	1.183	4.354
图4(d)	-	-
图4(e)	3.895	7.677
图4(f)	0.237	5.328

关联门限选取没有公式可借鉴,可根据经验选取,统计大量关联点距对极线的像素值,选择使关联准确率最

表3所示为关联结果的汇总。4台星敏感器拍摄的

高的值作为门限。对 300 组星图进行关联,关联点达到 1 032 对,统计不同门限取值下误关联目标的对数,计算误判率,结果如图 5 所示。

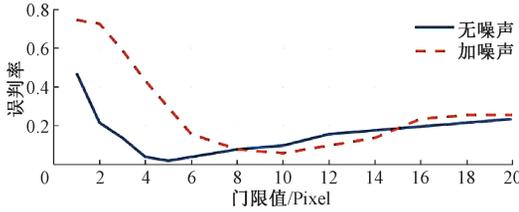


图 5 不同门限取值对关联误判率的影响
Fig.5 Influence of different threshold values on the associated error rate

由图 5 可知,在实际应用中,门限值取 8~12 pixel 时关联准确率可达 90%,以上数据和结论来自于大量实验统计能够为处理实际星图的目标关联提供较优的门限值参考。当门限值取值偏小,关联点被门限排除在外造成漏关联;当门限值取值过大,关联候选点数目增多导致误关联。本研究目标关联的结果将决定后续空间目标定轨数据的选取,误关联意味着将引入错误的观测数据,相较于漏关联有更恶劣的影响。

利用蒙特卡洛方法,模拟误关联的最大概率,随机生成 2 幅待关联图片的基础矩阵,每副图均随机生成 100 个点,最大模拟次数为 600 次,按照对极几何约束进行关联,统计有多个关联候选点的目标数,假设上述目标均关联错误,计算最大误判率,结果如图 6 所示。

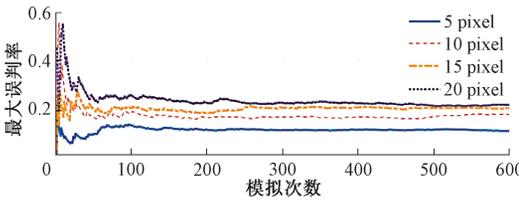


图 6 不同门限取值下最大误判率与模拟次数的关系
Fig.6 Relationship between the maximum false positive rate and the number of simulations under different threshold values

由图 6 可知,随着模拟次数的增加,最大误判率趋于稳定,当门限值分别取 5、10、15 和 20 pixel 最大误判率约为 10%、17%、19% 和 21%。

3 空间目标关联的实际应用

进行目标关联后可获取空间目标在多平台的观测数据,弥补星敏感器只具有测角信息而没有测距信息的不足,能够利用多台星敏感器协同确定空间目标的位置^[15-16]。

同一时刻,利用任意 2 观测平台便可解算空间目标

的位置。星敏感器在空间的位置,空间目标在星敏感器下的观测向量均可求解,空间目标的位置即为 2 条空间点向式直线的交点,几何关系如图 7 所示。

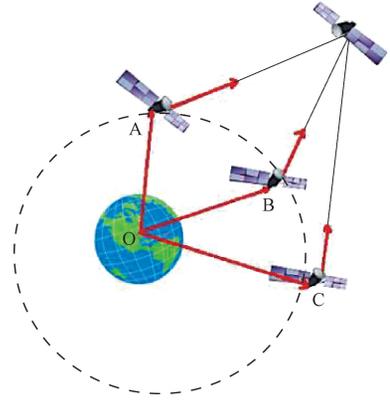


图 7 空间目标与星敏感器几何关系
Fig.7 Geometric relationship between space target and star sensor

同一时刻,观测到某一目标的星敏感器有 N 个,利用任意 2 平台观测信息求解空间目标位置坐标共有 C_N^2 个结果。考虑到有误关联的可能,空间目标坐标为三维,若这些空间目标坐标中任一维度存在与平均值偏差超过 3 倍标准差的数据,则定义为异常数据,剔除异常数据后,其余数据的平均值即可视为某空间目标在该时刻下的空间位置。

结合实验中的关联结果,GE01 和 GE05 为例,利用多星敏感器协同求解该时刻 2 个空间目标在 J2000 坐标系下的坐标,如表 5 所示。直观地反应两目标在空间的相对位置如图 8 所示。

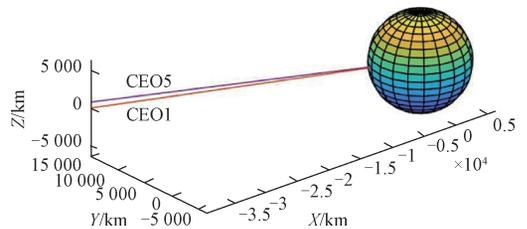


图 8 J2000 坐标系下两空间目标位置
Fig.8 Position of two space targets in J2000 coordinate system

4 结 论

本文提出的目标关联方法针对星图背景下空间目标关联研究较少和传统目标关联算法难以满足应用需求的现状,通过将远景的空间目标与近景的角点进行等效处理,借助图像匹配领域的算法解决目标关联问题,同时

表5 多星传感器协同求解空间目标位置
Table 5 Multi-star sensors collaboratively solve space target positions

星敏传感器协同组合	GE01 坐标/km	GE05 坐标/km
	X=-39 354. 21	
1&2	Y=15 132. 08 Z=64. 05	\
1&3	\	X=-39 346. 97 Y=15 141. 37 Z=842. 42
1&4	X=-39 357. 15 Y=15 116. 90 Z=63. 10	X=-39 337. 81 Y=15 139. 01 Z=845. 82
2&4	X=39 365. 25 Y=15 120. 68 Z=62. 39	\
3&4	\	X=-39 352. 8 Y=15 130. 21 Z=844. 06
平均值	X=-39 358. 87 Y=15 123. 22 Z=63. 18	X=-39 345. 86 Y=15 136. 86 Z=843. 87
实际位置	X=-39 359. 89 Y=15 125. 76 Z=64. 30	X=-39 347. 14 Y=15 135. 49 Z=844. 10

对于多红外传感器成像的弱小目标关联也有借鉴意义。

将实测数据与 STK 仿真平台相结合,添加合理噪声及干扰目标,通过实验验证了分布式星敏传感器下空间目标同步关联方法的可行性。对 300 组星图中 1 032 对点的关联结果进行统计和校验,以 10 pixel 作为门限参考值,准确率达 90%。利用蒙特卡洛法,经 600 次模拟,估计误判的最大概率。在求解空间目标位置的过程中可进一步对误关联导致的异常数据进行剔除,并能够求解空间目标各维度误差在 3 km 以内的 J2000 坐标。

经实验,本文提出的分布式星敏传感器下空间目标同步关联方法对于星敏传感器产生的抖动、测角和测距误差以及空间目标提取引入的干扰点有较好的适应性,相较于传统目标跟踪关联方法,无需跟踪拍摄推测轨迹就可以实现星图之间的目标关联,有较好的实时性和准确率,可以满足基于分布式星敏传感器进行空间目标定轨的工程应用需求。

参考文献

[1] REGAN D J. Modular neural network tasking of space

situational awareness systems [C]. The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2018.

[2] MADSEN G J, BLAND P A, BOLD M, et al. FireOPAL: Technical performance and first results [C]. The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2018;1171-1180.

[3] FENG F, LI H N, ZHANG Y S, et al. An improved synchronized orbit determination method based on distributed star sensors [C]. 69th International Astronautical Congress, 2018;3952-3956.

[4] 李文超, 邹焕新, 雷琳, 等. 目标数据关联技术综述 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(3):1-5.

LI W CH, ZOU H X, LEI L, et al. Overview of target data association technology [J]. Computer Simulation, 2014, 31(3):1-5.

[5] 孙宇嘉, 于纪言, 王晓鸣, 等. 适用于复杂场景的多目标跟踪算法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3):126-137.

SUN Y J, YU J Y, WANG X M, et al. Multi-target tracking algorithm for complex scenes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3):126-137.

[6] 王鑫, 王向军. 大视场双目视觉定位系统中多目标稀疏匹配 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7):302-307.

WANG X, WANG X J. Multi-target sparse matching in large-field binocular vision positioning system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7):302-307.

[7] 詹煜欣, 董文永. 基于对极几何约束的动态背景下运动目标检测 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35(11):268-271.

ZHAN Y X, DONG W Y. Moving target detection under dynamic background based on polar geometry constraints [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 35(11):268-271.

[8] 朱奇光, 张朋珍, 李昊立, 等. 基于全局和局部特征融合的图像匹配算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):170-176.

ZHU Q G, ZHANG P ZH, LI H L, et al. Image matching algorithm based on global and local feature fusion [J]. Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):170-176.

[9] 赵丹. 基于小视场星敏传感器的星图识别算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

ZHAO D. Research on star map recognition algorithm based on small field of view star sensor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

- [10] PIROVANO L, SANTERAMO D A, WITTIG A, et al. Probabilistic data association based on intersection of orbit sets [C]. The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2018:462-479.
- [11] 陈滨, 赵建军, 姚刚, 等. 对极几何约束下的粒子滤波目标协同跟踪算法[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(11):53-57.
CHEN B, ZHAO J J, YAO G, et al. Collaborative tracking algorithm for particle filter targets under polar geometric constraints[J]. Microelectronics & Computer, 2017, 34(11): 53-57.
- [12] 陶兆胜, 屠大维. 基于图像几何静矩的机器视觉基础矩阵估计 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8): 1776-1780.
TAO ZH SH, TU D W. Machine vision basic matrix estimation based on image geometric static moment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(8): 1776-1780.
- [13] 王元斌. 计算机视觉中射影不变量的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
WANG Y B. Research on projective invariants in computer vision [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [14] 易敏, 邢飞, 孙婷, 等. 高精度星敏传感器标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2154-2160.
YI M, XING F, SUN T, et al. Research on calibration method of high precision star sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2154-2160.
- [15] 高飞, 葛一粟, 汪韬, 等. 基于空间平面约束的视觉定位模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 183-190.

GAO F, GE Y S, WANG T, et al. Vision localization model based on spatial plane constraints [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 183-190.

- [16] 付朋, 陈新度, 吴磊. 基于角点的双目视觉绝对定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3):1-8.
FU P, CHEN X D, WU L. Research on absolute positioning of binocular vision based on corner points[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(3):1-8.

作者简介



黄秋实, 2017年于上海交通大学获得学士学位, 现于航天工程大学攻读硕士, 主要研究方向为空间目标关联。

E-mail: 1371027312@qq.com

Huang Qiushi received his B.Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2017.

He is currently pursuing his master degree at Space Engineering University. His main research interest is space target association.



张雅声(通信作者), 1996年和1999年于国防科技大学获得学士学位和硕士学位, 2006年于航天工程大学获得博士学位, 航天工程大学研究员, 主要研究方向为航天器轨道动力学, 星座设计和航天任务分析。

E-mail: 13521219203@139.com

Zhang Yasheng (Corresponding author) received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from National University of Defense Technology in 1996 and 1999, and received her Ph.D. degree from Space Engineering University in 2006. She is currently a professor at Space Engineering University. Her research interests include spacecraft orbit dynamics, the design of constellation and space mission analysis.