

文章编号 1004-924X(2017)07-1948-06

船用星敏传感器天体的跟踪辨识

唐 君*, 苏轼鹏

(海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

摘要:为保证船用星敏传感器载体姿态连续测量的高精度和高效率,通过对当前天体自动辨识算法的研究与分析,提出并实现一种基于天体目标连续跟踪处理的天体自动辨识技术。首先,根据星图采集周期、天体视运动速度和舰船姿态变化等因素,分析了船用星敏传感器摄取连续星图间的差别特征;然后,以连续两帧星图的关联信息为依据构建星图特征数组,通过区域搜索、斜率值与灰度值比对等方法建立了天体跟踪辨识模式;最后,介绍了天体跟踪辨识模式中区域搜索半径的解算方法。实验结果表明:天体连续跟踪辨识技术在保证天体辨识精度的前提下,平均单帧星图辨识时间为 124 ms,仅为传统辨识方法用时的 1/8。有效地提高了船用星敏传感器天体辨识效率和载体姿态动态测量效率。

关键词:星跟踪;天体辨识;星敏传感器;姿态测量

中图分类号:U675.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1948

Celestial bodies tracking identification for ship-borne star sensor

TANG Jun*, SU Shi-peng

(*Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China*)

* *Corresponding author, E-mail: tjdegree@163.com*

Abstract: In order to guarantee the high precision and high efficiency of the continuous measurement for the carrier attitude of the ship-borne star sensor, through researching and analyzing the automatic identification algorithm of the current celestial body, an automatic identification technology of the celestial body based on continuous tracking processing of the celestial body was proposed and realized. Firstly, according to the acquisition cycle of the star map, apparent movement of the celestial body, attitude variation of the ship and other factor, distinctive features among continuous star maps shot by the ship-borne star sensor were analyzed. Then, on the basis of the associated information about continuous two frames of star maps, the feature array of the star map was established; through region searching, slope value, comparison of gray value, and other methods, the tracking identification mode of the celestial body was established; Finally, the solving method of the radius for region searching in the tracking identification mode of the celestial body was introduced. The experimental result shows: on the premise of ensuring the identification accuracy of the celestial body, the identification time for the average single frame of the star map for the continuous tracking identification technology of the celestial body is 124 ms, which is 1/8 of identification time for the traditional identification method.

收稿日期:2016-10-24;修订日期:2017-01-06.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2013BAH36B03);辽宁省博士启动基金(No. 201501029)

The identification efficiency of the ship-borne star sensor and the dynamic measurement efficient of the carrier attitude is effectively improved.

Key words: star tracking; celestial bodies identification; star sensor; attitude measurement

1 引言

星敏传感器技术研究主要集中于航天领域,多应用于各类弹道导弹和卫星等航天飞行器上。对星敏传感器系统的一般要求是数据更新率高和测量精度高。因此在构建星敏传感器系统时,主要采用大视场光学系统结构,增强天区覆盖能力,以低星等的亮星为主要探测对象,减少天体辨识匹配星库的数据量,从而提高辨识效率与数据更新率^[1]。船用星敏传感器的工作环境在海平面下,受到大气折光、背景杂光、尘埃颗粒以及船体自身摇荡震动的影响,因而所获取的星空图像质量远不如航天飞行器上的星敏传感器。大视场光学系统结构会使单个像素对应的空间角分辨率大大降低,不利于获得高精度的星象质心坐标^[2]。因此,船用星敏传感器主要采用小视场光学系统结构来提高精度。然而,小视场观测弱化了星敏传感器的天区覆盖能力,为保证视场内观测天体的数量,势必要以高星等天体为探测对象^[3]。在此情况下,天体辨识匹配星库的数据量将产生数量级程度的增加,从而导致天体辨识效率与数据更新速率的降低,甚至引起误识别率的上升。因此,空间天体高精度、高效率的自动连续辨识技术^[4]不仅是船用星敏传感器系统技术的核心组成部分,更是决定其海上导航精度和效率的关键。

目前,基于全天区或局部天区的三角形识别算法^[5]是天体自动辨识技术的主流方向。虽然该方法可以通过天区分属^[6]的方式来构建和管理星库,以缩小天体辨识匹配范围。但是,星敏传感器的每次辨识过程都是针对一帧星空图像无记忆性的初始化辨识,即每次辨识过程都要在庞杂的星库中进行检索与匹配。而实际中,连续帧星图间存在着大量的关联性信息,可以为天体连续辨识提供有效的帮助。星敏传感器连续两帧星图的采集周期仅为角秒量级,故连续两帧星图中大部分星体都是相同的。基于此特征,本文以星敏传感器采集的星空图像初始帧为辨识依据,通过依次比对连续星图的数据信息和星像位置关系,脱离匹配星库实现了天体的连续跟踪辨识,有效提高了星敏传感器天体辨识的效率。

2 星体跟踪

2.1 连续帧星图特征分析

船用星敏传感器摄取连续两帧星图的差别是决定星体跟踪技术的关键。该差别由星图采集周期、天体视运动速度以及舰船姿态变化决定。文中用于实验的星敏传感器星图采集周期为40 ms。假设在较恶劣的海况影响下,舰船姿态变化的平均角速度为 $2(^{\circ} \cdot s^{-1})$,则星敏传感器摄取连续两帧星图对应的舰船姿态角的变化小于 0.1° 。另外,假设天体视运动处于最不利的情况,即观测者位于赤道上,此时天顶附近天体周日视运动的线速度最大。在此情况下,由于天体周日视运动角速度 $15(^{\circ} \cdot s^{-1})$,所以连续两帧星图中的星体位移 $S = 15(^{\circ} \cdot s^{-1}) \times 40 \text{ ms} = 0.6''$ 。

如图1所示,星敏传感器在 t_0 时刻和 t_1 时刻两次摄取的星图于非固定方向上存在重叠区域,并且两星图中,同一星体像点间的距离相差很小,该距离在特定测量情况下,小于确定值 r (pixel)。另外, t_0 时刻和 t_1 时刻两星图中相同星体在不同星图中两个像点坐标所确定直线的斜率也是一确定值,记为 k 。

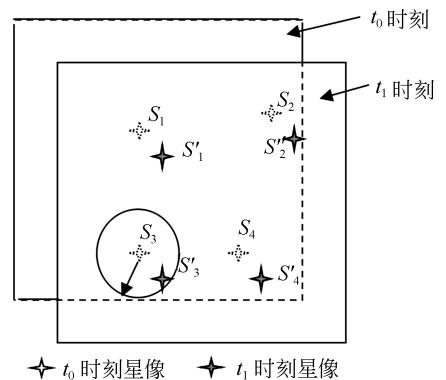


图1 星跟踪模式图

Fig. 1 Mode of star tracking

2.2 星体跟踪处理模式

t_0 时刻星图上的星体可以通过全天区或局部天区三角形算法进行初始化辨识。在系统程序中,为 t_0 时刻的星图构建一个二维数组 $a[n][5]$,

行数 n 为 t_0 时刻星图识别出的星体个数,5 列依次为星体序号、星像坐标 x 、星像坐标 y 、星等和星号。同样,为 t_1 时刻的星图建立数组 $b[m][6]$ ($m \leq n$),该数组的第 5 列星号信息在识别成功前暂置为空,新增第 6 列为斜率信息 k ,其他格式与 a 数组相同。

对 t_1 时刻的星图进行辨识,在星图上以某星体 n_i 在 t_0 时刻的星像坐标为圆心, r 为半径的圆形范围内搜索(搜索半径 r ,由 $t_1 - t_0$ 时间间隔内的舰船姿态变化值和天体周日视运动情况所确定,求解方法见第 3 节)。

$$\sqrt{(a[n_i][2]-b[m_j][2])^2+(a[n_i][3]-b[m_j][3])^2} \leq r. \quad (1)$$

如果在搜索范围 r 内有且仅有一颗星体 m_j (此时 $j=1$),则认为该星体在上一时刻已经辨识成功,计算该星体坐标和圆心坐标所确定直线的斜率值:

$$k_j = (d[n_i][3] - b[m_j][3]) / (d[n_i][3] - b[m_j][2]), \quad (2)$$

并将该值存放于 b 数组中:

$$b[m_j][6] = k_j. \quad (3)$$

如果在搜索半径 r 内有两颗以上的星体,则分别进行式(2)、(3)的计算,对比其灰度值(星等信息),设定灰度阈值为 0.1(根据大量实验数据确定),如果:

$$|a[n_i][4] - b[m_j][4]| \leq 0.1, \quad (4)$$

并且该星体的斜率值 $b[m_j][6]$ 与其他识别成功星体的斜率值在一定容错范围内相等,则认为该星体在上一时刻已经辨识成功,否则认为该星体是于 t_1 时刻新进入视场的星体,可采用有先验信息的三角形算法进行辨识(见下节)。如果在 t_1 时刻星图中有三颗以上星体跟踪辨识成功,就能够实现舰船载体的导航和姿态测量^[7]。该匹配模式以初始化辨识成功的第一帧星图为依据,通过在星图连续帧间进行区域搜索,斜率、星象灰度值比对,脱离庞杂的星库实现了天体的连续跟踪辨识。

2.3 有先验信息的三角形算法

星敏传感器摄取的星图与 t_0 时刻星图间的差异会随时间而逐渐增大,如果当前时刻的星图中出现新进入视场的星体,以跟踪辨识成功的任意两颗星体与新星体构成导航星三角形,通过有先验信息的三角形算法对新星体进行辨识。

三角形算法是目前应用最为广泛的星图识别方法。它将导航星构成的导航星三角形按“边-边” (边指的是星间角距) 的方式存储,来进行识别过程中的搜索匹配,实现起来比较简单、直观。但是三角形星图识别算法也存在着缺陷。以三颗导航星的全部信息和它们的星间角距所构成的存储单元将会占据大量的内存资源,严重影响星体识别的效率。而在有先验信息的三角形算法中,构成导航星三角形的其中两颗是在上一帧星图中辨识成功的星体,因此只需要在星库中对新进入视场的那颗星体进行辨识匹配,有效减少了星库的搜索时间和发生冗余匹配的可能,大大提高了辨识的效率和准确率。

3 搜索半径 r 的确定

以上一帧星图中的星像坐标为依据,搜索连续帧星图中同一星像的关键就是搜索区域半径 r 的确定。而半径 r 由舰船姿态变化及天体周日视运动所确定。首先确定舰船姿态变化对星像坐标变化的影响^[8]。

假设一个星图采集周期内舰船姿态变化在 h 度以内(实际情况中舰船姿态的变化是不确定的,即星敏传感器光轴的变化方向不确定,但其变化量小于某一定值 h ,可根据实际海况进行计算),假设星敏传感器光轴沿着赤纬增加的方向变化。在 t_i 时刻采集一帧星图,经过无记忆性的初始化辨识、恒星视位置计算得到星体的视位置,即赤道坐标 (α_i, δ_i) ,依据天体星像质心坐标,可解算视场中心也就是光轴在 t_i 时刻的初始指向的赤道坐标 (A_i, D_i) 。依据星敏传感器空间坐标系变换理论^[9],可获得天体在星敏传感器像平面坐标系下的基准坐标 (μ_i, ν_i) 。

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{\cos \delta_i \sin (\alpha_i - A_i)}{\sin D_i \sin \delta_i + \cos D_i \cos \delta_i \cos (\alpha_i - A_i)} \\ \nu_i &= \frac{\cos D_i \sin \delta_i - \sin D_i \cos \delta_i \cos (\alpha_i - A_i)}{\sin D_i \sin \delta_i + \cos D_i \cos \delta_i \cos (\alpha_i - A_i)} \end{aligned} \quad (5)$$

ν 轴指向天北极,赤纬增加的方向; μ 轴指向赤经增加的方向。基于星敏传感器光学系统标定理论^[9-10],天体基准坐标 (μ, ν) 通过光学系统标定参数与像平面坐标 (x, y) 建立对应关系如式(6):

$$\begin{aligned} \mu &= mx \cos \theta_1 - ny \sin \theta_2 + c \\ \nu &= mx \sin \theta_1 - ny \cos \theta_2 + f \end{aligned} \quad (6)$$

其中, θ_1 为 x 轴相对于 μ 轴的旋转角, θ_2 为 y 轴相对于 y 轴的旋转角; m, n 分别表示像平面坐标 (x, y) 基本单位与基准坐标 (μ, v) 基本单位之间的比例; c, f 表示像平面坐标系 xOy 相对于基准坐标系 μTv 的偏移^[9-10]。

经过一个图像采集周期到 t_j 时刻, 假设上一帧星图中识别出来的星体中仍有部分出现在 t_j 时刻的星图中, 则光轴指向为 $(A_i, D_i + h)$, 由于短时间内天体周日视运动产生的视位置变化很小, 在连续两次星图采集周期内可以将其忽略不计, 则 t_j 时刻拍摄的星体的基准坐标如下:

$$\mu_j = \frac{\cos \delta_i \sin (\alpha_i - A_i)}{\sin (D_i + h) \sin \delta_i + \cos (D_i + h) \cos \delta_i \cos (\alpha_i - A_i)}, \quad (7)$$

$$v_j = \frac{\cos (D_i + h) \sin \delta_i - \sin (D_i + h) \cos \delta_i \cos (\alpha_i - A_i)}{\sin (D_i + h) \sin \delta_i + \cos (D_i + h) \cos \delta_i \cos (\alpha_i - A_i)}. \quad (8)$$

根据式(6), 现设:

$$\begin{aligned} a &= m \cos \theta_1 - 1, b = -n \sin \theta_2, \\ d &= m \sin \theta_1, e = n \cos \theta_2 - 1 \end{aligned}, \quad (9)$$

则有:

$$\begin{aligned} x &= (-ec + e\mu + fb - vb) / (ae - bd) \\ y &= -(af - dc + d\mu - av) / (-ab + ae) \end{aligned} \quad (10)$$

根据 i 时刻和 j 时刻的基准坐标即可得到连续两时刻相同天体的像平面坐标 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) , 则搜索半径为:

$$r = \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2}. \quad (11)$$

4 星体跟踪辨识实验

用于实验的船用星敏传感器镜头焦距^[11]为 160 mm, CCD 面阵^[12]为 768×576 像素, 极限探测星等为 9 (构建星等 ≤ 9 的导航星库和三角形星库), 图像采集周期为 40 ms。连续摄取两帧星图, 如图 2 和图 3 所示。对 t_0 时刻星图采用传统算法进行初始化辨识, 经校对 12 颗星体全部辨识成功。以此为基础, 对 t_1 时刻星图进行跟踪辨识, 求解确定的搜索半径 $r = 31.5$ (pixel), 相同天体于两帧星图中所确定的直线斜率 k 均为 0.77, 12 颗星体全部辨识成功。辨识结果见表 1 和表 2。



图 2 t_0 时刻星图

Fig. 2 Star night image at t_0



图 3 t_1 时刻星图

Fig. 3 Star night image at t_1

表 1 t_0 时刻星图已成功识别星的信息

Tab. 1 Star informations at t_0

星号	X 坐标 /pixel	Y 坐标 /pixel	灰度值	赤经 /($^\circ$)	赤纬 /($^\circ$)
1	243.00	23.00	1.01	314.07	44.41
2	94.00	33.00	1.00	313.94	43.40
3	689.50	43.59	3.17	314.03	47.45
4	242.22	101.06	6.99	313.39	44.42
5	358.99	102.52	5.75	313.40	45.21
6	192.50	190.56	3.68	312.60	44.09
7	574.56	202.00	1.77	312.55	46.69
8	493.99	227.59	6.08	312.30	46.14
9	414.68	271.00	1.47	311.91	45.61
10	554.87	291.70	1.47	311.73	46.56
11	667.00	347.47	0.71	311.22	47.32
12	371.95	437.43	68.90	310.43	45.30

表 2 星跟踪算法得到的时刻星图的星信息

Tab. 2 Star informations at based on star tracing

星号	X 坐标 /pixel	Y 坐标 /pixel	灰度值	赤 经 /(°)	赤 纬 /(°)
1	224.50	8.80	1.01	314.07	44.41
2	75.50	18.80	1.00	313.94	43.40
3	670.99	29.39	3.17	314.03	47.45
4	223.72	86.86	6.99	313.39	44.42
5	340.49	88.31	5.75	313.40	45.21
6	173.99	176.36	3.68	312.60	44.09
7	556.06	187.80	1.77	312.55	46.69
8	475.49	213.39	6.08	312.30	46.14
9	396.18	256.80	1.47	311.91	45.61
10	536.37	277.49	1.47	311.73	46.56
11	648.50	333.27	0.71	311.22	47.32
12	353.45	423.23	68.90	310.43	45.30

为验证天体跟踪辨识技术的工作效率,使用船用星敏传感器连续摄取 100 帧星空图像,分别使用传统辨识算法和星体跟踪算法进行天体辨识。结果如图 4 所示(彩图见期刊电子版),无记忆性的传统辨识算法对 100 帧星图全部辨识成功,平均每帧星图用时 1 003 ms;天体跟踪辨识算法 100 帧星图同样全部辨识成功,平均每帧星图用时 124 ms,仅约为传统算法的 1/8。其中,跟踪辨识算法对首帧星图采用传统方法进行初始化辨识,用时 991 ms。此后自第 2 帧至第 83 帧星图采用跟踪辨识模式,每帧星图平均用时 111 ms。如图 4 中椭圆区域所示,自第 84 帧星图开始,辨识时间出现波动性增大,这是因为出现未经辨识的新星体进入视场,系统采用了有先验信息的三角形算法进行辨识。

参考文献:

- [1] 丁国鹏,张涛,郑伟波,等. 基于大视场星敏传感器的目标识别技术[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(9): 41-43, 47.
DING G P, ZHANG T, ZHENG W B, et al.. Target recognition technology based on star tracker with large field of view [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(9): 41-43, 47. (in Chinese)

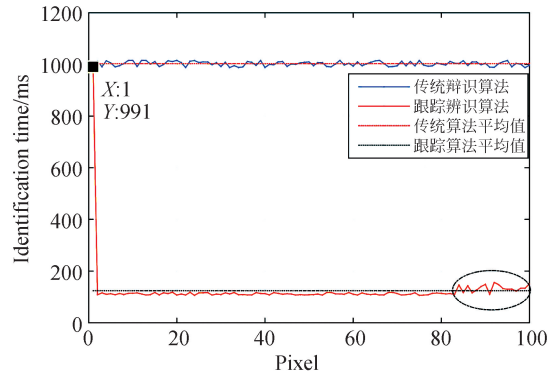


图 4 辨识时间比较

Fig. 4 Comparison of star identification

5 结 论

本文从海上导航的实际工作环境出发,分析指出了目前船用星敏传感器天体辨识技术效率较低的不足。通过对当前天体自动辨识算法的研究与分析,提出并实现一种基于天体目标连续跟踪处理的天体自动辨识技术。该技术以连续两帧星图的关联信息为依据构建星图特征数组,通过区域搜索、斜率值和灰度值比对等方法,脱离庞杂的匹配星库实现了天体的连续跟踪辨识;并通过有先验信息的三角形算法对初入视场的天体进行匹配识别;最后,介绍了天体跟踪辨识模式中区域搜索半径的解算方法。实验结果证明:天体连续跟踪辨识技术在保证天体辨识精度的前提下,平均单帧星图辨识时间为 124 ms,仅为传统辨识方法用时的 1/8。在不考虑首帧星图初始化辨识的情况下,平均单帧星图辨识时间为 111 ms,约为传统辨识方法用时的 1/10。有效提高了船用星敏传感器天体辨识效率和载体姿态动态测量效率。

- [2] HANCOCK B R, STIRBL R C, CUNNINGHAM T J, et al.. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy [J]. *SPIE*, 2001, 4284: 43-53.
[3] 吴量,王建立,王昊京. 三视场天文导航视场间星图识别的导航星选取[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1732-1741.
WU L, WANG J L, WANG H J. Guide star selection for star pattern recognition between three FOVs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1732-

1741. (in Chinese)
- [4] PADGETT C, KREUTZ-DELGADO K, UDOMKESMALEE S. Evaluation of star identification techniques [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, 20(2): 259-267.
- [5] 时圣革, 雷肖剑, 于长海. 星图识别三角形算法综述[J]. 光电技术应用, 2014, 29(5): 1-6.
SHI SH G, LEI X J, YU CH H. Triangle algorithm overview of star pattern recognition [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(5): 1-6. (in Chinese)
- [6] 孙剑明. 剖分特征集星识别法在天文导航中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3330-3335.
SUN J M. Application of subdivision feature set of star pattern recognition method in astronomical navigation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3330-3335. (in Chinese)
- [7] 唐君, 王安国, 张磊. 星敏传感器双通道观测技术[J]. 中国航海, 2013, 36(1): 5-8, 12.
TANG J, WANG A G, ZHANG L. Observation technique of dual-channel star sensor [J]. *Navigation of China*, 2013, 36(1): 5-8, 12. (in Chinese)
- [8] HO K. A survey of algorithms for star identification with low-cost star trackers [J]. *Acta Astronautica*, 2012, 73: 156-163.
- [9] 王安国, 王华斌, 唐君, 等. 基于星图自动辨识的光学系统精确标定方法[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 575-578.
WANG A G, WANG H B, TANG J, *et al.*. An accurate calibrating method of optical system based on the automatic identification of star map [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 575-578. (in Chinese)
- [10] 唐君, 李伟, 徐轩彬. 一种星敏传感器光学系统标定与引建的新方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1610-1615.
TANG J, LI W, XU X B. New method of star sensor's calibration and leading building [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1610-1615. (in Chinese)
- [11] 何舒文, 王延杰, 孙宏海, 等. 高动态科学级 CMOS 相机系统的设计[J]. 液晶与显示, 2015, 30(4): 729-735.
HE SH W, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. Design of high dynamic scientific CMOS camera system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 729-735. (in Chinese)
- [12] 柳红岩, 孙慧婷, 李岩, 等. 漂移扫描 CCD 星图的 smear 现象快速消除方法研究[J]. 液晶与显示, 2016, 31(3): 310-316.
LIU H Y, SUN H T, LI Y, *et al.*. Fast Smear effect removal algorithm of CCD drift-scan star image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 310-316. (in Chinese)

作者简介:



唐君(1983—),男,辽宁大连人,硕士,讲师,2011年于海军大连舰艇学院获得硕士学位,主要从事天文导航及军事航海等方面的研究。E-mail: tjdegree@163.com