



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115290100 A

(43) 申请公布日 2022. 11. 04

(21) 申请号 202210600826.6

(22) 申请日 2022.05.30

(71) 申请人 中国人民解放军火箭军工程大学
地址 710025 陕西省西安市灞桥区洪庆镇
同心路2号

(72) 发明人 张志利 周召发 段辉 常振军
王韶迪

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214
专利代理师 燕肇琪

(51) Int. Cl.

G01C 21/24 (2006.01)

G01C 21/02 (2006.01)

G01C 21/16 (2006.01)

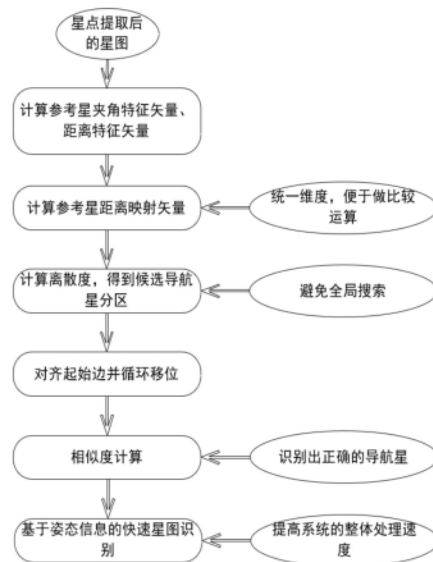
权利要求书5页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法。以最靠近图像中心的恒星作为参考星,利用参考星及其邻星的夹角特征和距离特征构造夹角特征矢量、距离特征矢量和距离映射矢量;基于距离映射矢量计算参考星与导航星之间的离散度得到候选导航星;利用夹角、距离信息对搜索参考星夹角特征矢量与候选导航星夹角特征矢量的对应起始边并循环移位;最终得到相似度最高的星即为正确的导航星;进行实时预测的快速识别。本发明同现有技术相比的优越性在于,构造了参考星的夹角特征矢量,计算得到含抗干扰码的距离映射矢量以提高算法的鲁棒性;最大程度的降低计算量,提高实时性能;保证了算法的识别正确性;提高算法的可靠性。



1. 一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:包括特征提取、导航星库构建、候选导航星筛选、参考星识别与基于姿态信息的快速星图识别五大步骤,具体如下:

步骤1:特征提取

采用两种旋转和平移不变的特征—邻星与中心导航星的欧式距离 D_i 、连续相邻恒星与中心导航星构成的相对角 Φ_i ,并基于这两种特征构造每颗导航星的星模式,如图2所示,令每颗导航星处在视场的中心,并考虑所有位于半径 R 内的邻星来提取上述两个特征,邻星按照逆时针的顺序分别记为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 。 R 与星敏视场角FOV之间的关系为:

$$\text{FOV} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{R\rho}{f} \right) \quad (1)$$

式中, f 为焦距, ρ 为像素尺寸,半径 R 为距离中心的最大距离;

步骤2:导航星库构建

导航星库中,每颗导航星分别有夹角特征矢量 Φ 、距离特征矢量 D 和距离映射矢量 Λ ,利用各个邻星与导航星在图像坐标系中的位置坐标,再结合 Φ_i 和 D_i 的表达式可以求得导航星与邻星之间的夹角特征矢量 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N)$ 以及距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$ 。其中, Φ_i 和 D_i 分别为理想星图中参考星位于CCD中心时,两颗邻星的相邻夹角和邻星与参考星的径向距离。上述特征统一按照逆时针的方式进行排列。此外,还需要构造导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$,用于缩短导航星库列表,得到候选导航星分区(即筛选出来的一个导航星集合),其中, Λ_i 为理想星图得到的映射值, N_D 为距离映射矢量的维数。有了候选导航星分区,后续便可利用夹角特征矢量 Φ 和距离特征矢量 D 识别出参考星唯一对应的导航星;

步骤3:候选导航星分区

步骤3.1:对于星敏传感器拍摄的星图而言,在星点质心定位过程完成之后,选定距离图像中心最近的星点作为参考星,并提取出参考星和邻星之间的夹角特征矢量 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$ 以及距离特征矢量 $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)$,然后构建 N_D 维参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$,其中, φ_i 和 d_i 分别为实拍星图中参考星位于CCD中心附近时,两颗邻星的相邻夹角和邻星与参考星的径向距离; λ_i 为实拍星图得到的映射值;

步骤3.2:基于距离映射矢量 λ 对导航星库中的恒星列表进行分区,即筛选出符合条件的候选导航星,组成一个新的区域(集合),如此,步骤4的参考星识别过程便只需在该分区内的导航星中进行,利用图像信号求解星点的二维质心坐标时,会面临杂散光、仪器噪声、质心算法精度低等问题,使得质心坐标存在一定偏差,进而导致参考星与邻星间的径向距离 d_i 产生偏差, T_i 值计算不准确, T_i 代表第 i 个邻星的映射位置。为提高本发明方法的抗噪性能,在计算 T_i 值时,若 $d_i / (R/N_D)$ 满足相关约束条件,则说明该 T_i 值很容易受到噪声影响,需在距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 中添加抗干扰码, ζ_1 为抗干扰码阈值;

步骤3.3:计算参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 与导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$ 之间的离散度 X 。将离散度 X 小于等于离散度阈值 ζ_2 的导航星确定为候选导航星,得到候选导航星分区;

步骤4:参考星识别

有了候选导航星分区,便可基于参考星的夹角特征矢量 φ 以及距离特征矢量 d 来识别出唯一对应的导航星,具体步骤如下:

步骤4.1:由于星敏传感器拍摄星图时旋转角的随机性,导致参考星和导航星构造特征矢量的起始边不一致,为后续得到正确的参考星、导航星累积夹角特征矢量 e 、 E ,并计算二者之间的相似度 P ,必须保证矢量 Φ 、 φ 中的第一位与矢量 D 、 d 中的第一位都相等;以参考星的某一个距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 为基础,依次遍历候选导航星分区内导航星的夹角特征矢量 Φ 与距离特征矢量 D ,筛选出包含 (d_i, φ_i) 的导航星,并进行下一步累积夹角特征矢量与相似度的计算;

步骤4.2:参考星与导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 在对齐起始边(起始夹角)后,计算二者之间的相似度,识别出与参考星对应的正确导航星;

步骤5:基于姿态信息的快速星图识别

针对星敏传感器的在 k 、 $k+1$ 时刻拍摄而言,两次拍摄时所处的姿态显然发生了变化,则恒星在CCD成像平面上的投影也会随之发生移动,为快速得到 $k+1$ 时刻拍摄星图中的星点质心预测位置,避免全天区星图识别以提高系统的整体处理速度,可利用惯导提供的短时高精度姿态变化信息对星点的位置进行实时精确预测,如下:

$$\begin{cases} x = f \frac{\cos \delta \sin(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)} \\ y = f \frac{\sin \delta \cos D - \cos \delta \sin D \cos(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}$$

式中, A 、 D 、 θ 分别为 $k+1$ 时刻星敏传感器的光轴指向和旋转角,可基于惯导提供的姿态信息解算出来。基于惯导系统提供的姿态信息得到星点在CCD平面上的坐标预测值后,即以坐标预测值为中心,在该中心较小的邻域内进行星点提取与质心定位操作,并对所有提取出来的星点进行快速验证性识别,以防错误提取星点。得到已知恒星在载体坐标系下的实际质心坐标后,便可利用QUEST等定姿算法计算出当前时刻在载体坐标系与天球坐标系之间的姿态转换矩阵。

2. 根据权利要求1所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:在步骤1“特征提取”过程中,两种旋转和平移不变的特征—邻星与中心导航星的欧式距离 D_i 、连续相邻恒星与中心导航星构成的相对角 Φ_i 计算如下:

$$\Phi_i = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_{i+1} - y_c}{x_{i+1} - x_c}\right) - \arctan\left(\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}\right), & i = 1, 2, \dots, N - 1 \\ 360 - \arctan\left(\frac{y_N - y_c}{x_N - x_c}\right) + \arctan\left(\frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c}\right), & i = N \end{cases} \quad (3)$$

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中, x_i 和 y_i 分别为第 i 个邻星在图像坐标系中的坐标, N 是视场中所有邻星的总数目,

x_c 和 y_c 为导航星在图像坐标系中的坐标。

3. 根据权利要求1所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:在步骤2“导航星库构建”过程中,构造距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$ 时,起始边 D_i 选取的不同,对应到夹角特征矢量 Φ 和距离特征矢量 D 上只是进行了循环移位,并不影响矢量的本质特征,以 D_{\min} 为起始边构造 D 与 Φ , 其中, $D_{\min} = \min \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$, 选择哪条边作为起始边并不影响;根据前面已得到导航星和邻星之间的距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$, 通过距离特征矢量 D 计算导航星距离映射矢量 Λ ; 导航星与邻星间的径向距离 D_i 最大为 R , 距离映射矢量是一个 N_D 维矢量信号, N_D 值由下式给出,其中 k 值由试验测试确定,矢量中每一位的取值为0或者1,具体取值方法如下:首先令 N_D 维距离特征矢量全为0,将 D_i 代入下式,得到 T_i , 则距离映射矢量 Λ 的第 T_i 位置1,依次遍历距离特征矢量 D 中的 D_i ($i \in 1 \sim N$), 即得 N_D 维导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$;

$$N_D = 2^k; k \in Z \quad (5)$$

$$T_i = \text{round} \left(\frac{D_i}{R / N_D} \right) \quad T_i \in \{1, 2, \dots, N_D\} \quad (6)。$$

4. 根据权利要求1所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:在步骤3“候选导航星筛选分区”过程中,添加抗干扰码时,对于满足式(6)的径向距离 d_i , 在第 T_i 位和第 $T_i + 1$ 位都置1,满足式(7)的径向距离 d_i , 在第 T_i 位和第 $T_i - 1$ 位都置1;在后续对参考星与导航星的距离映射矢量 λ 、 Λ 做离散度计算时,保证成功匹配率更高和分区内的候选导航星包含正确参考星的概率更高;引入抗干扰码提高抗噪性能; ζ_1 为抗干扰码阈值,

$$\frac{d_i}{R / N_D} \geq T_i - \zeta_1 \quad (7)$$

$$\frac{d_i}{R / N_D} \leq (T_i - 1) + \zeta_1 \quad (8)。$$

5. 根据权利要求4所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:在对参考星与导航星的距离映射矢量 λ 、 Λ 做离散度计算时过程中,计算参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 与导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$ 之间的离散度 X 时,首先将 λ 与 Λ 做按位与运算并累计求和得到 B 值, B 值代表参考星与该颗导航星能够匹配上的邻星数量,再用该颗导航星的邻星数量之和减去 B 值,即可得到离散度 X , 具体计算公式如下:

$$B = \sum_{i=1}^{N_D} \lambda_i \& \Lambda_i \quad (9)。$$

$$X = \sum_{i=1}^{N_D} \Lambda_i - B$$

6. 根据权利要求4所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:在对参考星与导航星的距离映射矢量 λ 、 Λ 做离散度计算时过程中,导航星的离散度 X 越小,代表参考星与该导航星越匹配,该导航星是待识别导航星的可能性越大;将离散度 X 小于等于离散度阈值 ζ_2 的导航星确定为候选导航星,归入候选导航星分区,为步骤4的参考星识别做准备,如下式所示:

$$X \leq \zeta_2 \quad (10)。$$

7. 根据权利要求1所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:步骤4.1“对齐起始边”的过程中,若 S_1 为起始边,则导航星的距离特征矢量 D 、夹角特征矢量 Φ 如下所示:

$$\begin{cases} D = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}) \\ \Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\{D, \Phi\} = \left\{ \begin{array}{l} (D_1, \Phi_1), (D_2, \Phi_2), (D_3, \Phi_3), (D_4, \Phi_4), (D_5, \Phi_5), (D_6, \Phi_6), \dots \\ (D_7, \Phi_7), (D_8, \Phi_8), (D_9, \Phi_9), (D_{10}, \Phi_{10}), (D_{11}, \Phi_{11}), (D_{12}, \Phi_{12}) \end{array} \right\}$$

星敏感器实拍星图以图3为例(假设存在两颗缺失星、三颗伪星),则任取一边,例如以 S_5 为起始边,则参考星的 d 、 φ 如下式所示:

$$\begin{cases} d = (d_5, d_{F1}, d_6, d_7, d_8, d_{F2}, d_9, d_{F3}, d_{10}, d_{12}, d_1, d_2, d_4) \\ \varphi = (\varphi_5 - \varphi_{F1}, \varphi_{F1}, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F2}, \varphi_{F2}, \varphi_9 - \varphi_{F3}, \varphi_{F3}, \varphi_{10} + \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4) \end{cases} \quad (12)$$

$$\{d, \varphi\} = \left\{ \begin{array}{l} (d_5, \varphi_5 - \varphi_{F1}), (d_{F1}, \varphi_{F1}), (d_6, \varphi_6), (d_7, \varphi_7), (d_8, \varphi_8 - \varphi_{F2}), (d_{F2}, \varphi_{F2}), \dots \\ (d_9, \varphi_9 - \varphi_{F3}), (d_{F3}, \varphi_{F3}), (d_{10}, \varphi_{10} + \varphi_{11}), (d_{12}, \varphi_{12}), (d_1, \varphi_1), (d_2, \varphi_2 + \varphi_3), (d_4, \varphi_4) \end{array} \right\}$$

8. 根据权利要求1所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:步骤4.1“对齐起始边”的过程中,以参考星的某一个距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 为基础,依次遍历所有候选导航星的夹角特征矢量 Φ 与距离特征矢量 D ,筛选出包含 (d_i, φ_i) 的导航星,并进行下一步累积夹角特征矢量与相似度的计算,识别出正确的导航星;实拍星图在星点质心定位时,面临杂散光、仪器噪声、质心算法精度低问题,距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 存在一定的误差,在遍历过程中只要某导航星的 (D_j, Φ_j) 满足下式的约束,即符合匹配条件,可以进行后续相似度的计算:

$$\begin{cases} |d_i - D_j| \leq \zeta_3 \\ |\varphi_i - \Phi_j| \leq \zeta_4 \end{cases} \quad (13)$$

式中, d_i 为参考星第 i 个距离特征, D_j 为导航星第 j 个距离特征, φ_i 为参考星第 i 个夹角特征, Φ_j 为导航星第 j 个夹角特征, ζ_3 为距离阈值, ζ_4 为夹角阈值;夹角特征矢量 Φ 、 φ 中都包含 (d_6, φ_6) , Φ_6 处于 Φ 中第6位, φ_6 处于 φ 中第3位,将 Φ 向左循环移5位、 φ 向左循环移2位得:

$$\begin{aligned} \Phi' &= (\Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5) \\ \varphi' &= (\varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F2}, \varphi_{F2}, \varphi_9 - \varphi_{F3}, \varphi_{F3}, \varphi_{10} + \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 - \varphi_{F1}, \varphi_{F1}) \end{aligned} \quad (14)$$

求出 Φ' 、 φ' 的累积夹角特征矢量 E 、 ε ,计算相似度 P ,只要夹角特征矢量 Φ 、 φ 的起始位置匹配正确,参考星与其对应的正确导航星之间仍然能够得到非常好的匹配效果,具有很强的鲁棒性:

$$\begin{aligned} E &= (\Phi_6, \Phi_6 + \Phi_7, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9 + \Phi_{10}, \dots) \\ \varepsilon &= (\varphi_6, \varphi_6 + \varphi_7, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 - \varphi_{F2}, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 + \varphi_9 + \varphi_8 - \varphi_{F3}, \dots) \end{aligned} \quad (15)$$

9. 根据权利要求1所述的一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:步骤4.2“参考星与导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 在对齐起始边(起始夹角)后”,分别利用参考星和导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 构造各自的累积夹角特征矢量 $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$ 和 $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)$,其中各个元素分别定义为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_u &= \sum_{i=1}^u \varphi_i, \quad u \in \{1, 2, \dots, m\} \\ E_u &= \sum_{i=1}^u \Phi_i, \quad u \in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \quad (16)$$

计算累积夹角特征矢量 ε 与 E 之间的相似度 P , P 的初值置0, 计算方法如下:

步骤4.2.1: ε_i 和 E_j 中, 下标 i 、 j 分别从1开始计数, 即 $i = j = 1$,

步骤4.2.2: ε_1 对 E_j 遍历(j 从1到 n), 若 ε_1 与 E_k ($k \in 1 \sim n$)接近, 即满足累积夹角约束式(18), 则认为 ε_1 与 E_k 匹配, 相似度 $P = 1$, 且令 $i = i + 1 = 2$, $j = k + 1$, ε_2 对 E_j 遍历(j 从 $k + 1$ 到 n), ζ_5 为累计夹角阈值;

$$|\varepsilon_i - E_i| \leq \zeta_5 \quad (17)$$

步骤4.2.3: 若 ε_1 与 $E_1 \sim E_n$ 都不匹配, 则令 $i = i + 1 = 2$, $j = 1$, ε_2 对 E_j 遍历(j 从1到 n), 此时 $P = 0$;

步骤4.2.4: 当满足 $i > m$ 或者 $j > n$ 时, 累积夹角特征矢量匹配结束, 此时的相似度 P 表示待识别参考星与某颗候选导航星之间累积夹角特征矢量匹配成功的对数。

一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法

技术领域

[0001] 本发明属于航空航天领域,涉及一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法。

背景技术

[0002] 运载体在执行空间任务时需要时刻知道自身的三轴精确指向,因此,高精度地确定运载体姿态历来都是研究热点之一。其中,姿态信息主要由姿态敏感器实时测量,常见的姿态敏感器有星敏感器、陀螺、地平仪、磁强计等等。星敏感器是目前精度最高的姿态敏感器之一,其以恒星为参考,可以将姿态数据提升至角秒级,且稳定性很好。星敏感器有空间迷失模式和跟踪模式两种,大部分时间星敏感器是处于跟踪模式下。当星敏感器处于空间迷失模式时,首先,需要对星图进行预处理并提取出星点质心坐标;然后,通过星图识别方法确定提取出的星点在导航星表中对应的星号及其相关信息;最后,利用恒星在星敏感器坐标系与天球坐标系中的坐标矢量求解姿态。其中,星图识别步骤最为关键。SILANI 等人于2006年发表在《IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems》42卷第4期的文章《Star identification algorithms: novel approach & comparison study》中提出 polestar 方法,该方法以角距为特征,在选定参考星后,挑选出某一半径内所有邻星,并得到这些邻星与参考星之间的角距,接着以某种映射方式得到二进制矢量并通过投票的思想在导航星库中进行匹配识别。ZHANG 等人于2008年发表在《Image and Vision Computing》26卷第7期的文章《Full-sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern》中将星图识别过程分为两个步骤,先利用参考星与邻星间的径向距离特征初始匹配,缩小搜索范围,再利用环向特征匹配参考星唯一对应的导航星。LEE 等人于2007年发表在《IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems》43卷第3期的文章《Star pattern identification technique by modified grid algorithm》中开发了改进的栅格方法,将传统的笛卡尔坐标系替换为极坐标系并构造极坐标栅格,提高了现有栅格方法的鲁棒性。NA 等人于2009年发表在《IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems》45卷第2期的文章《Modified grid algorithm for noisy all-sky autonomous star identification》中将优化问题中的最小损失函数思想引入到星图识别中,以最小损失函数来衡量参考星模式与导航星模式之间的差异。而且,在识别过程中添加了新的星等特征,并将其作为损失函数的权重,使得算法更加合理。然而,现有算法或使用了主星的最近邻星作为校准星,而最近邻星容易匹配错误导致算法完全失效,导致算法识别精度低;或由于数据库过于庞大、识别步骤较为繁琐,导致算法实时性较差;此外,某些算法在星图中存在伪星、缺失星和较大星点位置噪声时,会出现识别精度较低等问题。因此,想要将星图中星点可靠、快速地识别出来,是一项很有挑战性的任务。

发明内容

[0003] 为了解决现有技术中存在的问题,本发明提出了一种基于姿态信息的分区快速星

图识别方法,其解决了恶劣环境下的星图识别问题,其在保证良好识别精度与实时性的基础上,具有更广泛的适用范围。

[0004] 现将本发明构思及技术解决方案叙述如下:

[0005] 本发明的基本思路是,首先,本发明方法以最靠近图像中心的恒星作为参考星,利用参考星及其邻星的夹角特征和距离特征构造夹角特征矢量、距离特征矢量和距离映射矢量。其次,基于距离映射矢量计算参考星与导航星之间的离散度,缩短导航星库列表,得到候选导航星。接着,利用夹角、距离信息对搜索参考星夹角特征矢量与候选导航星夹角特征矢量的对应起始边并循环移位。然后,基于夹角特征矢量构造累积夹角特征矢量,并计算参考星与符合条件的导航星之间的相似度,最终得到相似度最高的星即为正确的导航星。最后,基于惯导系统提供的姿态信息,对星点在CCD平面上的位置进行实时预测,以实现后续拍摄星图中恒星的快速识别。

[0006] 本发明一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,其特征在于:包括特征提取、导航星库构建、候选导航星筛选、参考星识别与基于姿态信息的快速星图识别五大步骤,具体如下:

[0007] 步骤1:特征提取

[0008] 本发明采用了两种旋转和平移不变的特征—邻星与中心导航星的欧式距离 D_i 、连续相邻恒星与中心导航星构成的相对角 Φ_i ,并基于这两种特征构造每颗导航星的星模式,如图2所示。令每颗导航星处在视场的中心,并考虑所有位于半径 R 内的邻星来提取上述两个特征,邻星按照逆时针的顺序分别记为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 。 R 与星敏视场角FOV之间的关系为:

$$[0009] \quad FOV = 2 \tan^{-1} \left(\frac{R\rho}{f} \right) \quad (1)$$

[0010] 式中, f 为焦距, ρ 为像素尺寸,半径 R 为距离中心的最大距离。

[0011] 步骤2:导航星库构建

[0012] 导航星库中,每颗导航星分别有夹角特征矢量 Φ 、距离特征矢量 D 和距离映射矢量 Λ 。利用各个邻星与导航星在图像坐标系中的位置坐标,再结合 Φ_i 和 D_i 的表达式可以求得导航星与邻星之间的夹角特征矢量 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N)$ 以及距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$ 。其中, Φ_i 和 D_i 分别为理想星图中参考星位于CCD中心时,两颗邻星的相邻夹角和邻星与参考星的径向距离。上述特征统一按照逆时针的方式进行排列。此外,还需要构造导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$,用于缩短导航星库列表,得到候选导航星分区(即筛选出来的一个导航星集合)。其中, Λ_i 为理想星图得到的映射值, N_D 为距离映射矢量的维数。有了候选导航星分区,后续便可利用夹角特征矢量 Φ 和距离特征矢量 D 识别出参考星唯一对应的导航星。

[0013] 步骤3:候选导航星分区

[0014] 步骤3.1:对于星敏传感器拍摄的星图而言,在星点质心定位过程完成之后,选定距离图像中心最近的星点作为参考星,并提取出参考星和邻星之间的夹角特征矢量 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$ 以及距离特征矢量 $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)$,然后构建 N_D 维参考星距离映射矢量

$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 。其中, φ_i 和 d_i 分别为实拍星图中参考星位于 CCD 中心附近时, 两颗邻星的相邻夹角和邻星与参考星的径向距离; λ_i 为实拍星图得到的映射值。

[0015] 步骤 3.2: 下面, 基于距离映射矢量 λ 对导航星库中的恒星列表进行分区, 即筛选出符合条件的候选导航星, 组成一个新的区域 (集合)。如此, 步骤 4 的参考星识别过程便只需在该分区内的导航星中进行。利用图像信号求解星点的二维质心坐标时, 会面临杂散光、仪器噪声、质心算法精度低等问题, 使得质心坐标存在一定偏差, 进而导致参考星与邻星间的径向距离 d_i 产生偏差, T_i 值计算不准确, T_i 代表第 i 个邻星的映射位置。为提高本发明方法的抗噪性能, 在计算 T_i 值时, 若 $d_i / (R/N_D)$ 满足相关约束条件, 则说明该 T_i 值很容易受到噪声影响, 需在距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 中添加抗干扰码, ζ_1 为抗干扰码阈值。

[0016] 步骤 3.3: 计算参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 与导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$ 之间的离散度 X 。将离散度 X 小于等于离散度阈值 ζ_2 的导航星确定为候选导航星, 得到候选导航星分区。

[0017] 步骤 4: 参考星识别

[0018] 有了候选导航星分区, 便可基于参考星的夹角特征矢量 φ 以及距离特征矢量 d 来识别出唯一对应的导航星, 具体步骤如下。

[0019] 步骤 4.1: 由于星敏传感器拍摄星图时旋转角的随机性, 导致参考星和导航星构造特征矢量的起始边不一致。为了后续能够得到正确的参考星、导航星累积夹角特征矢量 ε 、 E , 并计算二者之间的相似度 P (含义见后文), 必须保证导航星与参考星的夹角特征矢量 Φ 、 φ 是从同一起始边开始构造的, 即矢量 Φ 、 φ 中的第一位与矢量 D 、 d 中的第一位都相等。因此, 应以参考星的某一个距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 为基础, 依次遍历候选导航星分区内所以导航星的夹角特征矢量 Φ 与距离特征矢量 D , 筛选出包含 (d_i, φ_i) 的导航星, 并进行下一步累积夹角特征矢量与相似度的计算。

[0020] 步骤 4.2: 参考星与导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 在对齐起始边 (起始夹角) 后, 计算二者之间的相似度, 识别出与参考星对应的正确导航星。

[0021] 步骤 5: 基于姿态信息的快速星图识别

[0022] 针对星敏传感器的在 k 、 $k+1$ 时刻拍摄而言, 两次拍摄时所处的姿态显然发生了变化, 则恒星在 CCD 成像平面上的投影也会随之发生移动, 为快速得到 $k+1$ 时刻拍摄星图中的星点质心预测位置, 避免全天区星图识别以提高系统的整体处理速度, 可利用惯导提供的短时高精度姿态变化信息对星点的位置进行实时精确预测, 如下:

$$[0023] \quad \begin{cases} x = f \frac{\cos \delta \sin(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)} \\ y = f \frac{\sin \delta \cos D - \cos \delta \sin D \cos(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)} \end{cases} \quad (2)$$

$$[0024] \quad \begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}$$

[0025] 式中, A 、 D 、 θ 分别为 $k+1$ 时刻星敏传感器的光轴指向和旋转角, 可基于惯导提供的姿

态信息解算出来。基于惯导系统提供的姿态信息得到星点在CCD平面上的坐标预测值后,即可以坐标预测值为中心,在该中心较小的邻域内进行星点提取与质心定位操作,并对所有提取出来的星点进行快速验证性识别,以防错误提取星点。得到已知恒星在载体坐标系下的实际质心坐标后,便可利用QUEST等定姿算法计算出当前时刻在载体坐标系与天球坐标系之间的姿态转换矩阵。

[0026] 本发明同现有技术相比的优越性在于,构造了参考星的夹角特征矢量 φ 与距离特征矢量 d ,并在距离特征矢量 d 的基础上,计算得到含抗干扰码的距离映射矢量 λ 以提高算法的鲁棒性;通过参考星与导航星之间的离散度计算得到候选导航星分区,最大程度的降低计算量,提高实时性能;通过在导航星的距离特征矢量 D 与夹角特征矢量 Φ 中搜索是否包含参考星的距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 以寻找起始边,并通过循环移位操作,得到参考星与导航星新的夹角特征矢量 φ' 、 Φ' ,保证了算法的识别正确性;计算夹角特征矢量 φ' 、 Φ' 的累积夹角特征矢量 ε 、 E ,并求出参考星与导航星之间的相似度 P ,进一步提高算法的可靠性。识别出正确的导航星后,基于惯导系统提供的姿态信息实时递推预测在当前新的时刻,恒星投影在星图中的质心位置。对所有提取出来的星点进行快速验证性识别后,剔除错误提取的星点后,便可利用QUEST等定姿算法计算出当前时刻在载体坐标系与天球坐标系之间的姿态转换矩阵。

附图说明

[0027] 图1:本发明中的星图识别过程示意图

[0028] 图2:导航星模式示意图

[0029] 图3:参考星模式示意图

[0030] 图4:匹配示意图1

[0031] 图5:匹配示意图2

具体实施方式

[0032] 现结合附图对本发明做进一步详细说明。

[0033] 本发明提出了一种基于姿态信息的分区快速星图识别方法,包括特征提取、导航星库构建、候选导航星筛选、参考星识别与基于姿态信息的快速星图识别五大步骤。

[0034] 如图1所示。总体工作流程为:计算参考星的夹角特征矢量 φ 、距离特征矢量 d ,并基于距离特征矢量 d ,得到含抗干扰码的距离映射矢量 λ ;对于邻星数量符合阈值范围的导航星,计算参考星与导航星距离映射矢量 λ 、 Λ 的离散度 X 以得到候选导航星分区;在导航星的距离特征矢量 D 与夹角特征矢量 Φ 中搜索参考星的距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 并对齐起始边,得到参考星与导航星新的夹角特征矢量 φ' 、 Φ' ;计算夹角特征矢量 φ' 、 Φ' 的累积夹角特征矢量 $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$ 、 $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)$,并求出参考星与导航星之间的相似度 P ,以识别出正确的导航星。其中, ε_i 和 E_i 分别为参考星和导航星的第 i 个累计夹角值。基于惯导系统提供的姿态信息实时递推预测恒星的质心位置,以实现基于姿态信息的快速星图识别。

[0035] 实施例1

[0036] 步骤1:特征提取

[0037] 参见图2:具体包括:

[0038] 两种旋转和平移不变的特征—邻星与中心导航星的欧式距离 D_i 、连续相邻恒星与中心导航星构成的相对角 Φ_i 计算如下:

$$[0039] \quad \Phi_i = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_{i+1}-y_c}{x_{i+1}-x_c}\right) - \arctan\left(\frac{y_i-y_c}{x_i-x_c}\right), & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ 360 - \arctan\left(\frac{y_N-y_c}{x_N-x_c}\right) + \arctan\left(\frac{y_1-y_c}{x_1-x_c}\right), & i = N \end{cases} \quad (3)$$

$$[0040] \quad D_i = \sqrt{(x_i-x_c)^2 + (y_i-y_c)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

[0041] 式中, x_i 和 y_i 分别为第 i 个邻星在图像坐标系中的坐标, N 是视场中所有邻星的总数目, x_c 和 y_c 为导航星在图像坐标系中的坐标。

[0042] 步骤2:导航星库构建

[0043] 构造距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$ 时,起始边 D_i 选取的不同,对应到夹角特征矢量 Φ 和距离特征矢量 D 上只是进行了循环移位,并不影响矢量的本质特征,以 D_{\min} 为起始边构造 D 与 Φ ,其中, $D_{\min} = \min\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$,选择哪条边作为起始边并不影响。

[0044] 前面已得到导航星和邻星之间的距离特征矢量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_N)$,下面通过距离特征矢量 D 计算导航星距离映射矢量 Λ 。导航星与邻星间的径向距离 D_i 最大为 R ,距离映射矢量是一个 N_D 维矢量信号, N_D 值由下式给出,其中 k 值由试验测试确定。矢量中每一位的取值为0或者1,具体取值方法如下。首先令 N_D 维距离特征矢量全为0,将 D_1 代入下式,得到 T_1 ,则距离映射矢量 Λ 的第 T_1 位置1。依次遍历距离特征矢量 D 中的 D_i ($i \in 1 \sim N$),即得 N_D 维导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$ 。

$$[0045] \quad N_D = 2^k; k \in Z \quad (5)$$

$$[0046] \quad T_i = \text{round}\left(\frac{D_i}{R/N_D}\right) \quad T_i \in \{1, 2, \dots, N_D\} \quad (6)$$

[0047] 步骤3:候选导航星筛选分区

[0048] 添加抗干扰码时,对于满足式(6)的径向距离 d_i ,在第 T_i 位和第 T_i+1 位都置1,满足式(7)的径向距离 d_i ,在第 T_i 位和第 T_i-1 位都置1。如此,在后续对参考星与导航星的距离映射矢量 λ 、 Λ 做离散度计算时,成功匹配率更高,可保证分区内的候选导航星包含正确参考星的概率更高。抗干扰码的引入,使得本发明方法具有较好的抗噪性能(该噪声主要指位置噪声)。 ζ_1 为抗干扰码阈值。

$$[0049] \quad \frac{d_i}{R/N_D} \geq T_i - \zeta_1 \quad (7)$$

$$[0050] \quad \frac{d_i}{R/N_D} \leq (T_i - 1) + \zeta_1 \quad (8)$$

[0051] 计算参考星距离映射矢量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_D})$ 与导航星距离映射矢量 $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{N_D})$ 之间的离散度 X 时,首先将 λ 与 Λ 做按位与运算并累计求和得到 B 值, B 值

代表参考星与 该颗导航星能够匹配上的邻星数量。再用该颗导航星的邻星数量之和减去B值,即可得到 离散度X。具体计算公式如下。

$$\begin{aligned}
 [0052] \quad B &= \sum_{i=1}^{N_D} \lambda_i \ \& \ \Lambda_i \\
 X &= \sum_{i=1}^{N_D} \Lambda_i - B
 \end{aligned} \tag{9}$$

[0053] 某导航星的离散度X越小,代表参考星与该导航星越匹配,该导航星是待识别导航星的可能性越大。将离散度X小于等于离散度阈值 ζ_2 的导航星确定为候选导航星,归入 候选导航星分区,为步骤4的参考星识别做准备,如下式所示:

$$[0054] \quad X \leq \zeta_2 \tag{10}$$

[0055] 此外,主星的邻星数量也是一个很好的星图特征,对参考星和导航星的邻星数量进行比较,可以快速剔除掉不符合要求的导航星。因此,只需要对邻星数量在一定阈值范围内的导航星进行离散度计算,这有助于提高整体执行效率。

[0056] 实施例2

[0057] 步骤4:参考星识别

[0058] 参见图2、图3、图4、图5:

[0059] 步骤4.1:对齐起始边。以图2中导航星的星模式为例,若 S_1 为起始边,则导航星的距离特征矢量D、夹角特征矢量 Φ 如下所示。

$$[0060] \quad \begin{cases} D = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}) \\ \Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}) \end{cases} \tag{11}$$

$$[0061] \quad \{D, \Phi\} = \left\{ \begin{aligned} & (D_1, \Phi_1), (D_2, \Phi_2), (D_3, \Phi_3), (D_4, \Phi_4), (D_5, \Phi_5), (D_6, \Phi_6), \dots \\ & (D_7, \Phi_7), (D_8, \Phi_8), (D_9, \Phi_9), (D_{10}, \Phi_{10}), (D_{11}, \Phi_{11}), (D_{12}, \Phi_{12}) \end{aligned} \right\}$$

[0062] 星敏器实拍星图以图3为例(假设存在两颗缺失星、三颗伪星),则任取一边,例如以 S_5 为起始边,则参考星的d、 φ 如下式所示。

$$[0063] \quad \begin{cases} d = (d_5, d_{F1}, d_6, d_7, d_8, d_{F2}, d_9, d_{F3}, d_{10}, d_{12}, d_1, d_2, d_4) \\ \varphi = (\varphi_5 - \varphi_{F1}, \varphi_{F1}, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F2}, \varphi_{F2}, \varphi_9 - \varphi_{F3}, \varphi_{F3}, \varphi_{10} + \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4) \\ \{d, \varphi\} = \left\{ \begin{aligned} & (d_5, \varphi_5 - \varphi_{F1}), (d_{F1}, \varphi_{F1}), (d_6, \varphi_6), (d_7, \varphi_7), (d_8, \varphi_8 - \varphi_{F2}), (d_{F2}, \varphi_{F2}), \dots \\ & (d_9, \varphi_9 - \varphi_{F3}), (d_{F3}, \varphi_{F3}), (d_{10}, \varphi_{10} + \varphi_{11}), (d_{12}, \varphi_{12}), (d_1, \varphi_1), (d_2, \varphi_2 + \varphi_3), (d_4, \varphi_4) \end{aligned} \right\} \end{cases} \tag{12}$$

[0064] 以参考星的某一个距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 为基础,依次遍历所有候选导航星的夹角特征矢量 Φ 与距离特征矢量D,筛选出包含 (d_i, φ_i) 的导航星,并进行下一步累积夹角特征矢量与相似度的计算,识别出正确的导航星。此外,实拍星图在星点质心定位时,会面临杂散光、仪器噪声、质心算法精度低等问题,使得距离、夹角信息对 (d_i, φ_i) 存在一定的误差,因此在遍历过程中只要某导航星的 (D_j, Φ_j) 满足下式的约束,即符合匹配条件,可以进行后续相似度的计算。

$$[0065] \quad \begin{cases} |d_i - D_j| \leq \zeta_3 \\ |\varphi_i - \Phi_j| \leq \zeta_4 \end{cases} \tag{13}$$

[0066] 式中, d_i 为参考星第i个距离特征, D_j 为导航星第j个距离特征, φ_i 为参考星第i个

夹角特征, Φ_j 为导航星第 j 个夹角特征, ζ_3 为距离阈值, ζ_4 为夹角阈值。

[0067] 以图2、图3为例, 基于参考星特征中的 (d_6, φ_6) 来说明这一过程。此时, 夹角特征矢量 Φ 、 φ 中都包含 (d_6, φ_6) , Φ_6 处于 Φ 中第6位, φ_6 处于 φ 中第3位, 将 Φ 向左循环移5位、 φ 向左循环移2位得:

$$\begin{aligned} \Phi' &= (\Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9, \Phi_{10}, \Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5) \\ \varphi' &= (\varphi_6, \varphi_7, \varphi_8 - \varphi_{F2}, \varphi_{F2}, \varphi_9 - \varphi_{F3}, \varphi_{F3}, \varphi_{10} + \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_1, \varphi_2 + \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5 - \varphi_{F1}, \varphi_{F1}) \end{aligned} \quad (14)$$

[0069] 求出 Φ' 、 φ' 的累积夹角特征矢量 E 、 ε , 如下式所示, 并计算相似度 P (具体方法见后文), 可得 $P=10$ 。可以看出, 在实拍星图存在两颗缺失星、三颗伪星的恶劣环境下, 只要夹角特征矢量 Φ 、 φ 的起始位置匹配正确, 参考星与其对应的正确导航星之间仍然能够得到非常好的匹配效果, 而其余非正确导航星的相似度会非常低。针对实拍星图中缺失星和伪星的问题, 本发明方法具有很强的鲁棒性。

$$\begin{aligned} E &= (\Phi_6, \Phi_6 + \Phi_7, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9, \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9 + \Phi_{10}, \dots) \\ \varepsilon &= (\varphi_6, \varphi_6 + \varphi_7, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 - \varphi_{F2}, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8, \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 + \varphi_9 + \varphi_{10} - \varphi_{F3}, \dots) \end{aligned} \quad (15)$$

[0071] 步骤4.2: 下面说明参考星与导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 在对齐起始边 (起始夹角) 后, 如何计算二者之间的相似度 (下文 φ 、 Φ 看成是已经对齐了起始边)。分别利用参考星和导航星的夹角特征矢量 φ 、 Φ 构造各自的累积夹角特征矢量 $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$ 和 $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)$, 其中各个元素分别定义为:

$$\varepsilon_u = \sum_{i=1}^u \varphi_i, \quad u \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (16)$$

$$E_u = \sum_{i=1}^u \Phi_i, \quad u \in \{1, 2, \dots, n\}$$

[0074] 计算累积夹角特征矢量 ε 与 E 之间的相似度 P , P 的初值置0, 计算方法如下:

[0075] 步骤4.2.1: ε_i 和 E_j 中, 下标 i 、 j 分别从1开始计数, 即 $i=j=1$ 。

[0076] 步骤4.2.2: ε_i 对 E_j 遍历 (j 从1到 n), 若 ε_i 与 E_k ($k \in 1 \sim n$) 接近, 即满足累积夹角约束式 (18), 则认为 ε_i 与 E_k 匹配, 相似度 $P=1$, 且令 $i=i+1=2$, $j=k+1$, ε_2 对 E_j 遍历 (j 从 $k+1$ 到 n), ζ_5 为累计夹角阈值;

$$|\varepsilon_i - E_i| \leq \zeta_5 \quad (17)$$

[0078] 步骤4.2.3: 若 ε_i 与 $E_1 \sim E_n$ 都不匹配, 则令 $i=i+1=2$, $j=1$, ε_2 对 E_j 遍历 (j 从1到 n), 此时 $P=0$;

[0079] 步骤4.2.4: 当满足 $i > m$ 或者 $j > n$ 时, 累积夹角特征矢量匹配结束, 此时的相似度 P 表示待识别参考星与某颗候选导航星之间累积夹角特征矢量匹配成功的对数。

[0080] 实施例3

[0081] 为便于直观理解, 仍以图2、3为例, 给出具体的夹角值 (忽略噪声), 导航星 S 的夹角特征矢量 $\Phi = (23, 10, 32, 25, 50, 40, 25, 30, 35, 10, 30, 50)$, 累积夹角特征矢量 $E = (23, 33, 65, 90, 140, 180, 205, 235, 270, 280, 310, 360)$; 参考星 S' 的夹角特征矢量 $\varphi = (23, 42, 25, 25, 25, 40, 25, 17, 13, 20, 15, 40, 50)$, 累积夹角特征矢量 $\varepsilon = (23, 65, 90, 115, 140, 180, 205, 222, 235, 255, 270, 310, 360)$ 。按照步骤4.2.1~4.2.4计算累积夹角特征矢量 ε 与

E之间的相似度P,可得 $P=10$,图5中具体标注了累积夹角特征矢量 ε 和E之间的匹配情况。

[0082] 此外,若不采用上述先将夹角特征栅格 φ 、 Φ 循环移位对齐,再通过求累积夹角特征矢量 ε 与E,计算相似度P的方法,转而采用直接将夹角特征矢量 φ 、 Φ 按从小到大排列,计算 φ 、 Φ 相似度的方法。则排序后导航星S的夹角特征矢量 $\Phi=(10,10,23,25,25,30,30,32,35,40,50,50)$,参考星S'的夹角特征矢量 $\varphi=(13,15,17,20,23,25,25,25,25,40,40,42,50)$ 。按照步骤Step1~Step4计算 φ 、 Φ 之间的相似度P,可得 $P=5$,容易看出,本发明方法的识别能力更具优势,鲁棒性更强。

[0083] 步骤5:基于姿态信息的快速星图识别

[0084] 针对星敏感器的在k、k+1时刻拍摄而言,两次拍摄时所处的姿态显然发生了变化,则恒星在CCD成像平面上的投影也会随之发生移动,为快速得到k+1时刻拍摄星图中的星点质心,避免全天区星图识别以提高实时性,可利用惯导提供的短时高精度姿态变化信息对星点的位置进行实时预测,见公式(2)。

[0085] 基于惯导系统提供的姿态信息得到星点在CCD平面上的坐标预测值后,即以坐标预测值为中心,在该中心较小的邻域内进行星点提取与质心定位操作,并对所有提取出来的星点进行快速验证性识别,以防错误提取星点。得到已知恒星在载体坐标系下的实际质心坐标后,便可利用QUEST等定姿算法计算出当前时刻在载体坐标系与天球坐标系之间的姿态转换矩阵。

[0086] 选取SAO J2000星表中星等小于6的恒星作为导航星来完成星图匹配任务,利用无噪声仿真星图进行性能测试。此外,在仿真过程中分别加入位置噪声、伪星以及星等噪声等,以分析算法的性能表现。仿真参数如表1所示。

[0087] 表1仿真参数

Parameter	Value
Field of view	$12^{\circ} \times 12^{\circ}$
Focal length	50mm
Resolution	1024×1024 pixel
Pixel size	$13\mu\text{m}$
Sensitivity	6Mv

[0088] 随机生成10000幅理想仿真图像开展仿真实验,然后在10000幅理想仿真星图中分别添加不同强度的位置噪声、星等噪声和不同数量的伪星进行性能测试,以验证本发明方法的可靠性和鲁棒性。理想仿真星图的测试结果如表2所示。测试中,选择栅格方法(grid method)作为对比。

[0090] 在理想情况下,仿真图像中不存在星点位置噪声、星等噪声和伪星。表2总结了两种方法在理想情况下的性能。

[0091] 表2理想情况下的算法性能

方法	识别率/%	平均耗时/ms
Grid	99.27	9.27
Proposed	99.57	12.49

[0093] 表2中的结果表明,本发明方法在识别精度上优于栅格方法,平均耗时上也保持在

一个较好的水平,但比栅格方法略微差一些。下面通过在仿真图像中添加位置噪声、星等不确定性和伪星测试本发明方法的鲁棒性。

[0094] 表3含位置噪声的算法性能

	位置噪声标准差 /像素	Proposed 识别率/%	Grid 识别率/%
	0.1	99.3	98.1
	0.2	99.2	97.1
[0095]	0.3	98.6	95.5
	0.4	98.2	93.9
	0.5	97.9	91.7
	0.6	97.1	90.8
	0.7	96.5	89.4

[0096] 表3可知,本发明方法对位置噪声的敏感度较低。这主要是因为本发明方法通过将径向距离特征映射到高维矢量上得到距离映射矢量,再加上抗干扰码的辅助,在一定程度上降低了对位置噪声的敏感度。因此,该技术得以将识别率保持在96%以上。

[0097] 表4含星等噪声的算法性能

	星等噪声标准差	Proposed 识别率/%	Grid 识别率/%
	0.1	99.2	97.5
	0.2	98.9	96.7
[0098]	0.3	98.1	96.4
	0.4	97.4	95.1
	0.5	97.2	93.9
	0.6	96.2	93.7
	0.7	95.7	92.3

[0099] 本发明方法通过匹配夹角特征矢量的对应起始边,并在循环移位后进行相似度计算,使得本发明方法在存在多颗缺失星时仍能以很高的准确度识别出对应的导航星,如表4所示。

[0100] 表5含伪星的算法性能

	星等噪声标准差	Proposed 识别率/%	Grid 识别率/%
	1	99.3	98.7
[0101]	2	98.6	98
	3	97.8	96.4
	4	96.2	95.1
	5	95.7	92.2

[0102] 星图中含有伪星时,本发明方法的识别率变化较为平稳,在存在4颗伪星的恶劣条件下仍然能够保持在一个较高的水平。在存在伪星时,本发明方法识别率高的原因与存在缺失星时识别率较高的原因相同,简单来说,就是在存在多颗缺失星与伪星的条件下,本发明方法依旧能够保证参考星与导航星具有较高的相似度P,具体可参考图5的解释。

[0103] 综上所述,本发明首先计算得到夹角特征矢量 φ 、距离特征矢量 d ,为后续步骤的处理奠定了良好的基础;接着,在距离特征矢量 d 的基础上,计算得到含抗干扰码的距离映射矢量 λ ,对于邻星数量符合阈值范围的导航星,计算参考星与导航星距离映射矢量 λ 、 Λ 的离散度 X ,最终得到候选导航星分区,缩小恒星的查找范围,提高处理速度;接着,寻找导航星与参考星特征矢量的起始边,并基于起始边对夹角特征矢量 φ 、 Φ 循环移位,得到各自新的夹角特征矢量 φ' 、 Φ' ;然后,利用夹角特征矢量 φ' 、 Φ' 计算出累积夹角特征矢量 ε 、 E ,并求出参考星与导航星之间的相似度 P ,相似度 P 最大者即为正确的导航星;最后,一旦全天区星图识别完成后,即可基于惯导提供的姿态信息对后续拍摄星图进行快速星图识别,以提高系统的整体计算速度。

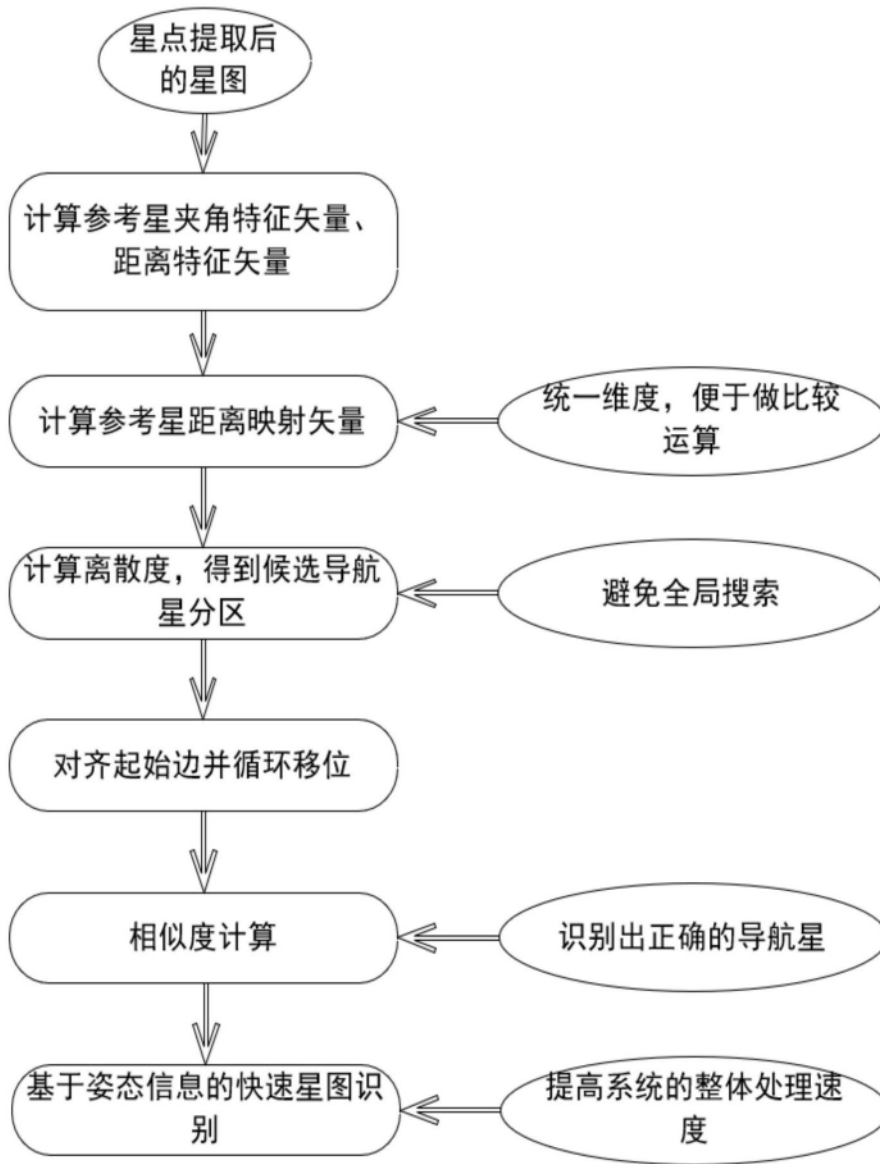


图1

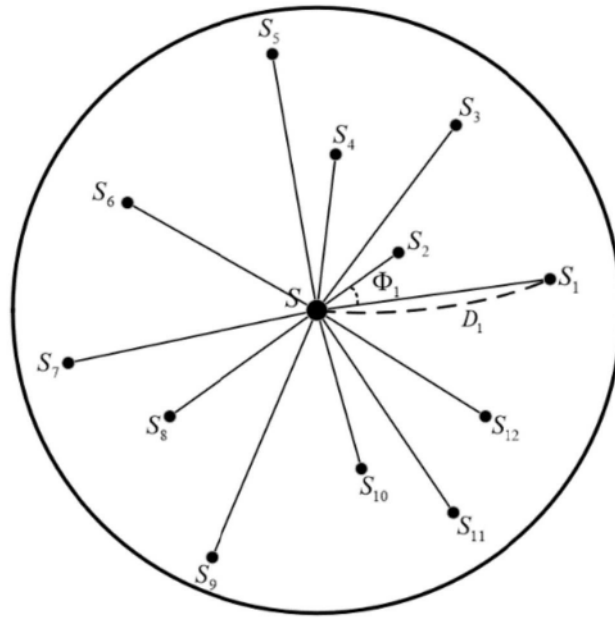


图2

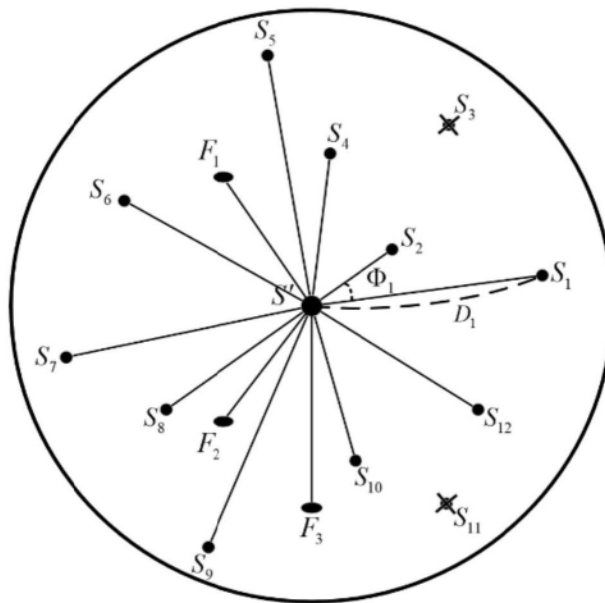


图3

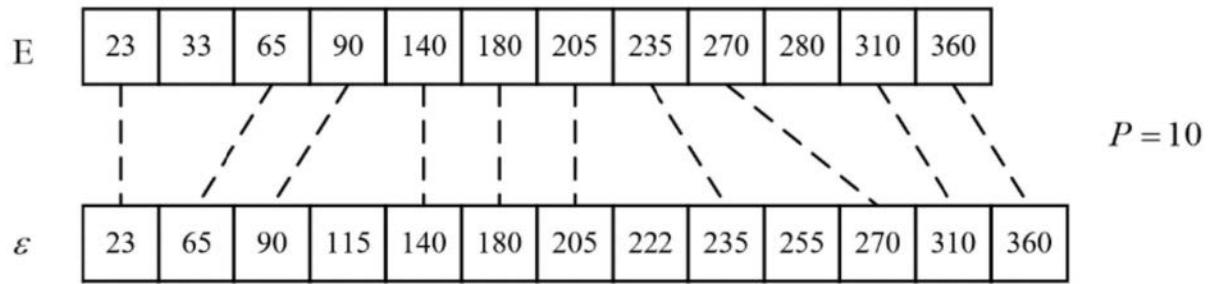


图4

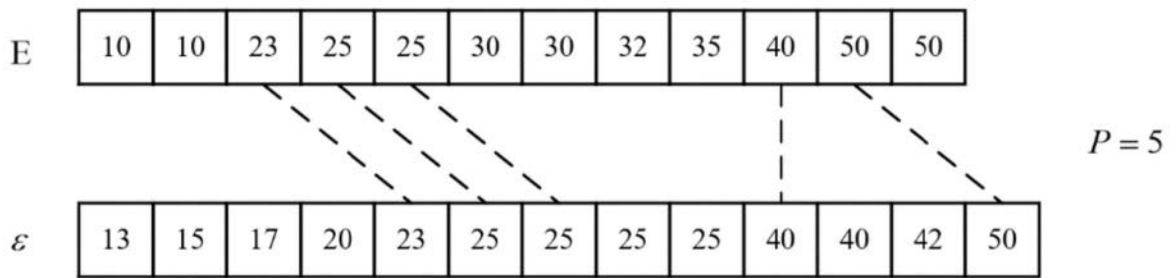


图5