



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112179335 B

(45) 授权公告日 2022.06.24

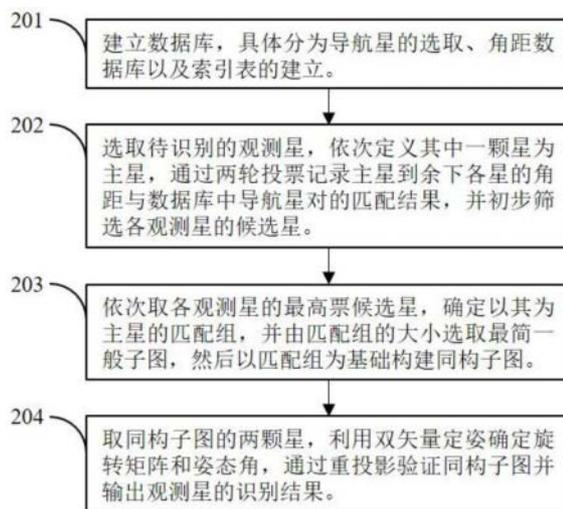
(21) 申请号 202010979427.6  
 (22) 申请日 2020.09.17  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 112179335 A  
 (43) 申请公布日 2021.01.05  
 (73) 专利权人 北京航空航天大学  
 地址 100191 北京市海淀区学院路37号  
 (72) 发明人 魏新国 刘皓 李健 王刚毅  
 张广军  
 (74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
 任公司 11251  
 专利代理师 安丽  
 (51) Int.Cl.  
 G01C 21/02 (2006.01)

(56) 对比文件  
 CN 103868510 A, 2014.06.18  
 CN 1958394 A, 2007.05.09  
 CN 106403929 A, 2017.02.15  
 CN 106289240 A, 2017.01.04  
 CN 109813303 A, 2019.05.28  
 DE 3935609 C1, 1990.12.13  
 US 2019041217 A1, 2019.02.07  
 刘炳琪等. “中远程导弹惯性/星光组合导航关键技术及研究现状”. 《系统工程理论与实践》. 2019, 第39卷 (第5期), 第1354-1355页.  
 倪娜等. “一种位并行近似串匹配的星图识别算法”. 《宇航学报》. 2014, 第35卷 (第11期), 第1280-1282页.  
 审查员 梁斯均

权利要求书2页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称  
 一种基于最简一般子图的星图识别方法

(57) 摘要  
 本发明公开一种基于最简一般子图的星图识别方法, 包括: 建立角距数据库, 具体分为导航星的选取、角距数据库以及索引表的建立; 选取待识别的观测星, 依次定义其中一颗星为主星, 通过两轮投票记录主星到余下各星的角距与数据库中导航星对的匹配结果, 并初步筛选各观测星的候选星; 依次取各观测星的最高票候选星, 确定以其为主星的匹配组, 并由匹配组的大小选取最简一般子图, 然后以匹配组为基础构建同构子图; 取同构子图的两颗星, 利用双矢量定姿确定旋转矩阵和姿态角, 通过重投影验证同构子图并输出观测星的识别结果。本发明继承了多边形算法的可靠性和组匹配算法的高效性, 对星点位置噪声、星等噪声以及假星都有很好的鲁棒性。



1. 一种基于最简一般子图的星图识别方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

步骤201:建立数据库,具体分为导航星的选取、角距数据库以及索引表的建立;

步骤202:选取待识别的各观测星,依次定义其中一颗观测星为主星,余下星为伴星,逐一计算主星到各伴星的角距,并配合索引表在角距数据库中搜索与之匹配的角距对,通过两轮投票记录主星到余下各伴星角距的匹配结果,并初步筛选各观测星的候选星;

步骤203:根据步骤202的角距匹配结果,依次取各观测星的最高票候选星,确定以该候选星为主星的匹配组,根据所述匹配组的大小选取最简一般子图,并以匹配组为基础,通过添加设定数量的辅边构建同构子图;

步骤204:基于步骤203构建的同构子图的主星,同时在构成辅边的伴星中取在步骤202中得票最高的一颗伴星,利用双矢量定姿 (TRAID) 确定旋转矩阵与姿态角,并通过重投影验证同构子图,以提升算法的鲁棒性,同时实现星图中全部观测星的识别,为更精确的姿态解算提供基础;

所述步骤203中,最简一般子图具体实现为:

(1) 利用期望模型估算任意子图中主星候选星的数量,进而评估子图的有效性;设定导航星均匀地分布在天球,子图以主星、伴星为顶点、星间角距为边,定义主星到伴星的角距为主边,伴星间的角距为辅边,对于任意子图,任取一颗导航星作为子图中主星的候选星,将余下子图拆解成连接不同伴星的角距集合,且每个角距仅属于某个伴星,逐一确定匹配各角距集合的概率,联立并乘以星库中导航星的总数得到主星候选星数量的期望值,若某伴星与主星组成星对的角距为 $\theta$ ,角距测量不确定度为 $\sigma$ ,导航星数量为 $N$ ,则匹配该角距的概率 $P_1$ 为:

$$P_1 = 1 - (1 - \sin\theta \sin\sigma)^{N-1}$$

若某伴星(3)除与主星(1)组成星对之外,还与另一颗伴星(2)组成星对,角距集合为 $\{\theta_{13}, \theta_{23}\}$ ,则匹配该角距集合的概率 $P_2$ 为:

$$P_2 = 1 - \left(1 - \frac{l_1 l_2}{4\pi}\right)^{N-2}$$

$$l_1 = \arccos(\bar{e}_1 \cdot \bar{e}_2) \cdot \sin(\theta_{13})$$

$$\bar{e}_1 = (x_1, \sqrt{1-x_1^2})$$

$$\bar{e}_2 = (x_2, \sqrt{1-x_2^2})$$

$$x_1 = \frac{\cos(\theta_{23} + \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{13}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{13}}$$

$$x_2 = \frac{\cos(\theta_{23} - \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{13}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{13}}$$

$$l_2 = \arccos(\bar{e}_3 \cdot \bar{e}_4) \cdot \sin(\theta_{23})$$

$$\bar{e}_3 = (x_3, \sqrt{1-x_3^2})$$

$$\bar{e}_4 = (x_4, \sqrt{1-x_4^2})$$

$$x_3 = \frac{\cos(\theta_{13} + \sigma) - \cos \theta_{12} \cos \theta_{23}}{\sin \theta_{12} \sin \theta_{23}}$$

$$x_4 = \frac{\cos(\theta_{13} - \sigma) - \cos \theta_{12} \cos \theta_{23}}{\sin \theta_{12} \sin \theta_{23}}$$

其中,中间参数 $l_1, l_2, x_1, x_2, x_3, x_4$ 为标量, $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_4$ 为矢量;通过大量采样,求取 $P_1$ 和 $P_2$ 的均值作为通用参数;若某伴星除与主星组成星对之外,还与 $n-1$ 颗伴星组成星对,角距集合为 $\{0\}_n$ ,则匹配该角距集合的概率 $P_n$ 为:

$$P_n = \frac{P_2^{n-1}}{P_1^{n-2}}$$

若某子图共拆成了 $k$ 个连接不同伴星的角距集合,则主星候选星数量期望 $E$ 为:

$$E = N \prod_{i=1}^k P_{m_i}$$

其中 $m_i$ 表示第 $i$ 个角距集合中包含的角距数量;

(2) 按照子图中包含的顶点数量以及辅边数量对子图进行分类,计算各类子图主星候选星数量,设定阈值,对于包含相同顶点数量的各类子图,取满足阈值要求并包含最少辅边的子图作为最简一般子图,汇总对应不同顶点数量的最简一般子图,并以此为标准筛选主星候选星,根据步骤203中确定的匹配组的大小,选择对应的最简一般子图,通过角距匹配,向匹配组添加辅边,直至构成同构的最简一般子图。

## 一种基于最简一般子图的星图识别方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及航空航天领域星敏感器技术,特别是涉及一种基于最简一般子图的星图识别方法。

### 背景技术

[0002] 星敏感器是航天器姿态控制系统的重要组成部分,其通过识别星图中的恒星实现航天飞行器的三轴姿态的获取。星敏感器的姿态测量精度可以达到角秒级,在空间飞行器中得到了广泛的应用。

[0003] 星图识别是星敏感器的关键技术。现有的星图识别算法主要分为两大类,一类是以栅格算法、径向环向算法为代表模式识别类算法,一类是以多边形算法和组匹配算法为代表的子图同构类算法。与模式类算法相比,子图同构类算法对观测星数量的要求更低,也更易于实现。同时,该类算法还对噪声具有很好的鲁棒性。子图同构类算法以星为顶点,星与星之间的角距为边,将观测星图视为全天星图的子图,并在全天星图中寻找与观测星图匹配的区域。

[0004] 多边形算法和组匹配算法是两类经典的子图同构类算法。在观测星数量较少的情况下,多边形算法由于对星点角距的利用更为充分,较组匹配算法更为可靠。但是随着观测星数量的增加,多边形子图也愈发复杂,在子图可靠性提升的同时,算法效率也大大降低。此外,数据库占用空间大也是限制多边形算法的一个劣势。组匹配算法由于引入了投票机制,在算法的效率上更具优势。但是该算法需要一定数量的观测星,保证算法的可靠性。

[0005] 可以看出,基于子图同构的方法中需要一种可以针对不同数量的观测星选取合适子图筛选导航星,以解决多边形算法的效率问题和组匹配算法在观测星数量少时的可靠性问题,同时对噪声鲁棒、数据库占用空间小的通用算法。

### 发明内容

[0006] 本发明技术解决问题:为解决多边形算法和组匹配算法在可靠性和效率上存在的问题,提供一种基于最简一般子图的星图识别方法,本发明继承了多边形算法的可靠性和组匹配算法的高效性,对星点位置噪声、星等噪声以及假星都有很好的鲁棒性。

[0007] 为达到上述目的,本发明的技术方案是这样实现的:

[0008] 本发明一种基于最简一般子图的星图识别方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤201:建立数据库,具体分为导航星的选取、角距数据库以及索引表的建立。通过角距匹配实现构建同构子图的构建,角距匹配即在数据库中搜索在一定误差范围内匹配观测星对角距的导航星对。数据库的大小由导航星的数量决定,为保证算法的实时性,需尽量精简数据库中导航星的数量。索引表的建立则是为了缩减搜索匹配的导航星对的时耗;

[0010] 步骤202:选取待识别的各观测星,依次定义其中一颗观测星为主星,余下星为伴星,逐一计算主星到各伴星的角距,并配合索引表在角距数据库中搜索与之匹配的角距对,通过两轮投票记录主星到余下各伴星的角距匹配结果,并初步筛选各观测星的候选星;

[0011] 步骤203:根据步骤202的角距匹配结果,依次取各观测星的最高票候选星,确定以该候选星为主星的匹配组,根据所述匹配组的大小选取最简一般子图,并以匹配组为基础,通过添加设定数量的辅边进一步构建同构子图;

[0012] 步骤204:基于步骤203构建的同构子图的主星,同时在构成辅边的伴星中取在步骤202中得票最高的一颗伴星,利用双矢量定姿 (TRAID) 确定旋转矩阵与姿态角,并通过重投影验证同构子图,以提升算法的鲁棒性,同时实现星图中全部观测星的识别,为更精确的姿态解算提供基础。

[0013] 所述步骤203中的最简一般子图具体为:

[0014] (1) 利用期望模型估算任意子图中主星候选星的数量,进而评估子图的有效性;设定导航星均匀地分布在天球,子图以主星、伴星为顶点、星间角距为边,定义主星到伴星的角距为主边,伴星间的角距为辅边,对于任意子图,任取一颗导航星作为子图中主星的候选星,将余下子图拆解成连接不同伴星的角距集合,且每个角距仅属于某个伴星,逐一确定匹配各角距集合的概率,联立并乘以星库中导航星的总数得到主星候选星数量的期望值,若某伴星与主星组成星对的角距为 $\theta$ ,角距测量不确定度为 $\sigma$ ,导航星数量为 $N$ ,则匹配该角距的概率 $P_1$ 为:

$$[0015] \quad P_1 = 1 - (1 - \sin\theta \sin\sigma)^{N-1}$$

[0016] 若某伴星3除与主星1组成星对之外,还与另一颗伴星2组成星对,角距集合为 $\{\theta_{13}, \theta_{23}\}$ ,则同时匹配该角距集合的概率 $P_2$ 为:

$$[0017] \quad P_2 = 1 - \left(1 - \frac{l_1 l_2}{4\pi}\right)^{N-2}$$

$$[0018] \quad l_1 = \arccos(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) \cdot \sin(\theta_{13})$$

$$[0019] \quad \vec{e}_1 = (x_1, \sqrt{1-x_1^2})$$

$$[0020] \quad \vec{e}_2 = (x_2, \sqrt{1-x_2^2})$$

$$[0021] \quad x_1 = \frac{\cos(\theta_{23} + \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{13}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{13}}$$

$$[0022] \quad x_2 = \frac{\cos(\theta_{23} - \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{13}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{13}}$$

$$[0023] \quad l_2 = \arccos(\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_4) \cdot \sin(\theta_{23})$$

$$[0024] \quad \vec{e}_3 = (x_3, \sqrt{1-x_3^2})$$

$$[0025] \quad \vec{e}_4 = (x_4, \sqrt{1-x_4^2})$$

$$[0026] \quad x_3 = \frac{\cos(\theta_{13} + \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{23}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{23}}$$

$$[0027] \quad x_4 = \frac{\cos(\theta_{13} - \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{23}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{23}}$$

[0028] 其中,中间参数 $l_1, l_2, x_1, x_2, x_3, x_4$ 为标量, $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_4$ 为矢量;通过大量采样,

求取 $P_1$ 和 $P_2$ 的均值作为通用参数;若某伴星除与主星组成星对之外,还与 $n-1$ 颗伴星组成星对,角距集合为 $\{0\}_n$ ,则匹配该角距集合的概率 $P_n$ 为:

$$[0029] \quad P_n = \frac{P_2^{n-1}}{P_1^{n-2}}$$

[0030] 若某子图共拆成了 $k$ 个连接不同伴星的角距集合,则主星候选星数量期望 $E$ 为:

$$[0031] \quad E = N \prod_{i=1}^k P_{m_i}$$

[0032] 其中 $m_i$ 表示第 $i$ 个角距集合中包含的角距数量;

[0033] (2) 按照子图中包含的顶点数量以及辅边数量对子图进行分类,计算各类子图主星候选星数量,设定阈值,对于包含相同顶点数量的各类子图,取满足阈值要求并包含最少辅边的子图作为最简一般子图,汇总对应不同顶点数量的最简一般子图,并以此为标准筛选主星候选星,根据步骤203中确定的匹配组的大小,选择对应的最简一般子图,通过角距匹配,向匹配组添加辅边,直至构成同构的最简一般子图。

[0034] 所述步骤204中的重投影具体为:

[0035] 利用解算的姿态以及星敏感器的参数预测出现在视场范围内的导航星,并利用解算的旋转矩阵将这些导航星在天球坐标系下的方向矢量转换到星敏感器坐标系下,并最终确定它们在像素坐标系下的坐标。将这些导航星逐一投影到星图中,并在一定范围内搜索与之重合的观测星。记录重合的观测星与导航星。

[0036] 本发明与现有技术相比的优点是:

[0037] (1) 本发明继承了多边形算法的可靠性和组匹配算法的高效性,适用于包含4颗及以上观测星的星图,具有通用性;采用投票策略提高了方法的效率;本发明对星点位置噪声、亮度噪声以及假星具有很好的鲁棒性,有较好的应用前景。

[0038] (2) 本发明能够根据匹配情况自适应地选择最适合的子图完成星图识别。且采用角距数据库,避免了数据库占用空间大的问题。仿真实验表明,与同样利用角距构造同构子图以筛选候选星的组匹配法以及迭代法相比,当加入标准差为3个像素的星点位置噪声以及标准差为0.4mV的星等噪声时,本发明的识别率为96.5%,比迭代法高4.8%,比组匹配法高8.8%;当加入标准差为1个像素的星点位置噪声以及标准差为1mV的星等噪声时,本发明的识别率为93.8%,比迭代法高1.4%,比组匹配法高24.2%;当在待识别的观测星中加入4颗假星,并且加入标准差为1个像素的星点位置噪声以及标准差为0.4mV的星等噪声时,本发明的识别率为96.3%,比迭代法高2.2%,比组匹配法高28.8%;此外,本发明的平均运行时间约为12.4ms,仅为迭代法运行时间的79%,组匹配法运行时间的18%。

## 附图说明

[0039] 图1为本发明方法所定义的子图构成;

[0040] 图2为本发明方法实现流程图;

[0041] 图3为数学模型的例图;

[0042] 图4为重投影验证原理图;

[0043] 图5为某次实验中构建的最简一般子图;

- [0044] 图6为星点位置噪声对识别方法的影响；  
 [0045] 图7为星等噪声对识别方法的影响；  
 [0046] 图8为假星对识别方法的影响。

### 具体实施方式

[0047] 为了更好的理解本发明,首先对子图结构进行定义。

[0048] 如图1所示,选定的观测星为子图的顶点,定义其中一颗观测星为主星,余下星为伴星;观测星之间的角距为子图的边,定义主星到伴星的角距为主边,伴星之间的角距为辅边。如果一个子图的所有边均为主边,定义其为组结构子图,定义组结构子图添加若干辅边后构成的子图为一般子图。需要注意的是,一般子图包含组结构子图。子图同构方法能够直接高效实现星图识别的关键就是选取合理的子图筛选候选星。本发明通过构建的期望模型估算不同子图的有效性,从而归纳出一系列包含不同顶点数量的最简一般子图。本发明通过角距匹配实现同构子图的构建,在识别过程中选取合适的最简一般子图筛选候选星,从而实现星图识别。

[0049] 其次对星敏感器的成像原理作简单介绍。

[0050] 假定星敏感器的姿态角为 $(\alpha, \beta, \gamma)$ ,其中 $\alpha, \beta, \gamma$ 分为偏航角、俯仰角和滚动角,由星敏感器坐标系到天球坐标系的旋转矩阵M可表示为:

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\alpha - \pi/2) & -\sin(\alpha - \pi/2) & 0 \\ \sin(\alpha - \pi/2) & \cos(\alpha - \pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta + \pi/2) & -\sin(\beta + \pi/2) \\ 0 & \sin(\beta + \pi/2) & \cos(\beta + \pi/2) \end{pmatrix}$$

[0051] 
$$\begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0052] 某导航星在天球坐标系下的方向矢量 $(C_x, C_y, C_z)$ 到星敏感器坐标系下的方向矢量 $(S_x, S_y, S_z)$ 的变换可表示为:

$$\begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = M^T \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix}$$

[0053]

[0054] 若f为光学系统焦距,则该导航星的方向矢量由星敏感器坐标系转换到图像坐标系坐标(X,Y)的投影变换可表示为:

$$X = f \frac{S_x}{S_z}$$

[0055]

$$Y = f \frac{S_y}{S_z}$$

[0056]

[0057] 由图像坐标系坐标(X,Y)转换到像素坐标系坐标(U,V)可表示为:

$$U = X/D_x + U_0$$

[0058]

[0059]  $V=Y/D_y+V_0$

[0060] 其中 $D_x$ 、 $D_y$ 分别为水平方向和垂直方向像元尺寸， $(U_0, V_0)$ 为主点坐标。

[0061] 一、方法描述

[0062] 下面结合附图和具体仿真实例对本发明的技术方案进一步详细阐述。如图2所示，

[0063] 步骤201，建立数据库，具体分为导航星的选取、角距数据库以及索引表的建立；

[0064] 以依巴谷(Hipparcos)星表为例，选取亮度不小于6星等的恒星。随机生成10000个视轴，标记每个视轴指向的视场内最亮的10颗星，汇总所有的标记星作为导航星。并将角距值小于 $0.1^\circ$ 的两颗导航星作为双星剔除。导航星两两组合，设导航星 $i$ 和 $j$ 在天球坐标系下的方向矢量为 $c_i$ 和 $c_j$ ，该星对角距为：

[0065] 
$$d(i, j) = \arccos\left(\frac{c_i \cdot c_j}{|c_i| \cdot |c_j|}\right)$$

[0066] 以导航星 $i$ 在天球坐标系下的方向矢量 $c_i$ 为例，其等于：

[0067] 
$$c_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{pmatrix}$$

[0068] 其中 $\alpha_i$ 和 $\delta_i$ 分别为导航星 $i$ 在天球坐标系下的赤经和赤纬。计算各星对的角距并按数值从低到高排序。保留角距值在视场尺寸范围内的星对，并将这些星对的角距值、导航星编号存储到角距数据库中。为方便搜索匹配的星对，以星敏感器的测量不确定度 $0.04^\circ$ 为间隔将角距分成多个区间段，例如角距为 $8.5^\circ$ 的星对，其所在区间编号为：

[0069] 
$$n_s = \left\lceil \frac{8.5^\circ}{0.04^\circ} \right\rceil = 213$$

[0070]  $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算。建立角距数据库索引表，记录每个区间段所包含星对的编号区间。

[0071] 步骤202：选取待识别的观测星，依次定义其中一颗星为主星，通过两轮投票记录主星到余下各星的角距与数据库中导航星对的匹配结果，并初步筛选各观测星的候选星。

[0072] 取各观测星所在区域的灰度值之和表征观测星的亮度。选取视场内最亮的10颗观测星(不足10颗则取全部观测星)，并按亮度从高到低排序。定义第一颗观测星为主星，余下星为伴星。各伴星分别与主星组合，计算各星对的角距。设观测星 $I$ 和 $J$ 在星敏感器坐标系下的方向矢量为 $S_I$ 和 $S_J$ ，该星对角距为：

[0073] 
$$d(I, J) = \arccos\left(\frac{S_I \cdot S_J}{|S_I| \cdot |S_J|}\right)$$

[0074] 以观测星 $I$ 在星敏感器坐标系下的方向矢量 $S_I$ 为例，其等于：

[0075] 
$$S_I = \begin{pmatrix} -X_I \\ -Y_I \\ f \end{pmatrix}$$

[0076] 其中 $(X_I, Y_I)$ 为观测星 $I$ 在图像坐标系下的坐标， $f$ 为光学系统的焦距。为当前主星

安排N个计数器记录主星到各伴星角距的匹配结果,每个计数器对应一颗导航星。使用索引表在角距数据库中搜索与之匹配的导航星对,为避免重复计票,安排N个临时计数器记录每个观测星对的匹配结果,同样每个临时计数器对应一颗导航星。设观测星I为主星,K为伴星,若导航星对(i,k)匹配观测星对(I,K),

$$[0077] \quad |d(I,K) - d(i,k)| \leq \sigma$$

[0078] 其中 $\sigma$ 为角距测量不确定度,取 $0.04^\circ$ ,由于角距没有方向性,导航星i和k均可能是主星I的候选星,导航星i和k的临时计数器均置1;记录完观测星对(I,K)的全部匹配导航星后,将各导航星的计数器与临时计数器相加,之后将临时计数器清零以记录下一观测星对的匹配结果。当前主星到各伴星角距全部扫描完毕后,初步认定计数值不少于阈值T的导航星为当前主星的候选星。考虑到假星的存在,观测星数量超过8颗时,T取4;余下情况,T取3。在余下星中依次定义一颗观测星为主星,重复上述流程,直至筛选出所有待识别观测星的候选星。

[0079] 在次轮投票中,仍首先定义第一颗观测星为主星,余下星为伴星。为当前主星安排N个计数器,分别对应每颗导航星。各伴星分别与主星构成观测星对,扫描与各观测星对匹配的导航星对。为避免重复计票,安排N个临时计数器记录每个观测星对的匹配结果。不同于首轮投票,次轮投票条件更为严格。例如,观测星I为主星,K为伴星,若导航星对(i,k)匹配观测星对(I,K),且导航星i和k为观测星I和K的候选星,则与主星对应的导航星的临时计数器置1;记录完观测星对(I,K)的全部匹配导航星对后,将各导航星的计数器与临时计数器相加,之后将临时计数器清零。当前主星到各伴星角距全部扫描完毕后,认定计数值不少于阈值T的导航星为当前主星的候选星。在余下待识别观测星中依次定义一颗星为主星,重复上述流程,直至选取所有待识别观测星。经两轮投票后,第一颗观测星的部分高票候选星投票结果如表1所示。

[0080] 表1第一颗观测星的部分候选星

	候选星	得票
	390	9
[0081]	655	6
	1325	6
	1392	6
	1409	6

[0082] 步骤203:根据步骤202的投票结果,依次取各观测星的最高票候选星,确定以其为主星的匹配组,根据匹配组的大小选取最简一般子图,并以匹配组为基础,通过添加指定数量的辅边构建同构子图;

[0083] 确定以高票候选星为主星的匹配组,其过程如下:

[0084] 各伴星分别与主星构成观测星对,扫描与各观测星对匹配的导航星对。对于任意包含当前最高票候选星的匹配星对,若另一个颗星为对应伴星的候选星,则定义另一颗导航星为匹配组的伴星,并存储到匹配组单元。设定观测星1为主星,导航星390为其最高票导航星,以导航星390为主星的匹配组如表2所示,该匹配组即为同构的组结构子图。

[0085] 表2以导航星390为主星的匹配组

	导航星	观测星	得票
[0086]	397	2	9
	509	3	9
	471	4	9
	518	5	9
	481	6	9
	521	7	9
	475	8	9
	401	9	9
	560	10	9
[0087]	424	8	5

[0088] 匹配组的大小定义为匹配组的主星与伴星对应的观测星数量,因此以导航星390为主星的匹配组大小为10。当匹配组不小于4时,则以匹配组为基础构建同构最简一般子图;否则,在当前主星的候选星中删掉选定的高票候选星,并另取一颗最高票候选星并确定其所在的匹配组。当取完当前主星的5颗最高票候选星后,更换主星,直至取完所有观测星的最高票候选星。

[0089] 构建同构最简一般子图,其步骤如下:

[0090] 本发明推导了数学模型估算不同子图中主星的候选星数量,从而评估子图的有效性。

[0091] 设定导航星均匀地分布在天球,子图以主星、伴星为顶点、星间角距为边,定义主星到伴星的角距为主边,伴星间的角距为辅边。对于任意子图,任取一颗导航星作为子图中主星的候选星,将余下子图拆解成连接不同伴星的角距集合,且每个角距仅属于某个伴星的角距集合。逐一确定匹配各角距集合的概率,联立解出极点导航星匹配主星的概率,最后乘以星库中导航星数得到主星候选星数量的期望值。若某伴星与主星组成星对的角距为 $\theta$ ,角距测量不确定度为 $\sigma$ ,导航星数量为 $N$ ,则匹配该角距的概率 $P_1$ 为:

$$[0092] \quad P_1 = 1 - (1 - \sin\theta \sin\sigma)^{N-1}$$

[0093] 若某伴星3除与主星1组成星对之外,还与另一颗伴星2组成星对,角距集合为 $\{\theta_{13}, \theta_{23}\}$ ,则同时匹配该角距集合的概率 $P_2$ 为:

$$[0094] \quad P_2 = 1 - \left(1 - \frac{l_1 l_2}{4\pi}\right)^{N-2}$$

$$[0095] \quad l_1 = \arccos(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) \cdot \sin(\theta_{13})$$

$$[0096] \quad \vec{e}_1 = (x_1, \sqrt{1-x_1^2})$$

$$[0097] \quad \vec{e}_2 = (x_2, \sqrt{1-x_2^2})$$

$$[0098] \quad x_1 = \frac{\cos(\theta_{23} + \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{13}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{13}}$$

$$[0099] \quad x_2 = \frac{\cos(\theta_{23} - \sigma) - \cos\theta_{12} \cos\theta_{13}}{\sin\theta_{12} \sin\theta_{13}}$$

$$[0100] \quad l_2 = \arccos(\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_4) \cdot \sin(\theta_{23})$$

$$[0101] \quad \vec{e}_3 = (x_3, \sqrt{1-x_3^2})$$

$$[0102] \quad \vec{e}_4 = (x_4, \sqrt{1-x_4^2})$$

$$[0103] \quad x_3 = \frac{\cos(\theta_{13} + \sigma) - \cos \theta_{12} \cos \theta_{23}}{\sin \theta_{12} \sin \theta_{23}}$$

$$[0104] \quad x_4 = \frac{\cos(\theta_{13} - \sigma) - \cos \theta_{12} \cos \theta_{23}}{\sin \theta_{12} \sin \theta_{23}}$$

[0105] 其中,中间参数 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 为标量, $\vec{e}_1$ 、 $\vec{e}_2$ 、 $\vec{e}_3$ 、 $\vec{e}_4$ 为矢量。通过大量采样,求取 $P_1$ 和 $P_2$ 的均值作为通用参数。若某伴星除与主星组成星对之外,还与 $n-1$ 颗伴星组成星对,角距集合为 $\{0\}_n$ ,则匹配该角距集合的概率 $P_n$ 为:

$$[0106] \quad P_n = \frac{P_2^{n-1}}{P_1^{n-2}}$$

[0107] 通过上述推导,任何子图都可以任意拆分成连接各伴星的角距集合并求解主星的候选星数量期望。若某子图共拆成了 $k$ 个连接不同伴星的角距集合,则主星候选星数量期望 $E$ 为:

$$[0108] \quad E = N \prod_{i=1}^k P_{m_i}$$

[0109] 其中 $m_i$ 表示第 $i$ 个角距集合中包含的角距数量。以图3所示的子图为例,其中1号观测星为主星,余下5颗星为伴星,将子图拆分为如下星对: $(1,2)$ , $\{(1,3), (2,3)\}$ , $\{(1,4), (2,4)\}$ , $\{(1,5), (2,5), (3,5)\}$ , $(1,6)$ 。则主星的候选星数量期望为:

$$[0110] \quad f = N \cdot P_1 \cdot P_2^2 \cdot P_3 \cdot P_1 = N \cdot P_1 \cdot P_2^4$$

[0111] 某星敏传感器选用 $17 \times 17^\circ$ 圆形视场,数据库中导航星数量 $N$ 为3750,角距测量不确定度取 $0.04^\circ$ 。按照子图中包含的顶点数量以及辅边数量对子图进行分类,计算各类子图主星候选星数量。各类子图中主星的候选星数量汇总如表3所示。选定阈值,对于包含相同顶点数量的各类子图,取满足阈值要求且包含最少辅边数量的子图作为最简一般子图。鉴于四面体子图(金字塔子图)的期望值为 $3.2 \times 10^{-3}$ ,将其定义为包含4个顶点的最简一般子图,并以 $10^{-3}$ 为阈值筛选数量多于4个顶点的子图。各类最简一般子图汇总如表4所示。根据确定的匹配组的大小选取适合的最简一般子图筛选候选星。即在确定的匹配组(同构的组结构子图)基础上添加最少数量的辅边,使得同构子图能够高效且可靠地筛选主星的候选星。

[0112] 表3不同子图中主星的候选星数量期望

顶点数	辅边数					
	0	1	2	3	4	5
2	1075.1					
3	308.3	10.2				
4	88.4	2.9	$9.7 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-3}$		
5	25.3	$8.4 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-3}$	$9.2 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$
6	7.3	$2.4 \times 10^{-1}$	$8.0 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-7}$
[0113] 7	2.1	$6.9 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$8.3 \times 10^{-8}$
8	$6.0 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-2}$	$6.6 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$7.2 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-8}$
9	$1.7 \times 10^{-1}$	$5.7 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$6.8 \times 10^{-9}$
10	$4.9 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$5.9 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-9}$
11	$1.4 \times 10^{-2}$	$4.7 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$5.6 \times 10^{-10}$
12	$4.0 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$4.4 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$4.9 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-10}$
13	$1.2 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$4.2 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$4.6 \times 10^{-11}$
14	$3.3 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-11}$
15	$9.5 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$3.8 \times 10^{-12}$

[0114] 表4最简一般子图

顶点数	辅边数
4-7	3
[0115] 8-10	2
11-13	1
$\geq 14$	0

[0116] 将匹配组的伴星按照它们在步骤202中的次轮得票由高到低排序,按照顺序依次取一颗伴星与其后面的各伴星一一组成星对,直至最后两颗伴星构成星对。按顺序计算各星对的角距并与对应的辅边进行比较,并将误差在 $0.04^\circ$ 以内的辅边添加到同构子图中,直至匹配组转换成选定的最简一般子图。若匹配组包含的全部伴星对应 $n$ 颗观测星,为避免重复计票,安排 $C_n^2$ 个计数器记录添加的辅边数量,每个计数器分别对应子图中的每条辅边。匹配组的伴星对每匹配一条辅边,该辅边的计数器置1并对各计数器累计求和,当计数器之和增长至指定辅边数量时进入验证环节。以候选星390为主星的匹配组中共包含10个顶点,仅需添加两条辅边即可构成最简一般子图。经比较,伴星对(397,509)匹配辅边(2,3),伴星对(397,471)匹配辅边(2,4),同构子图构建完毕,进入验证环节。对于添加的第一条辅边,在与其对应的伴星对中取在步骤202中得票最高的一颗伴星进行标记。伴星对(397,509)为与添加的第一条辅边对应的星对,且两颗伴星的次轮得票均为9票,此时标记对应较亮观测星的伴星,即观测星2的伴星397。若不能完成最简一般子图的构建,则在当前主星的候选星中删掉该最高票候选星,并另选一颗高票候选星构建同构子图。

[0117] 步骤204:取同构子图的两颗星,利用双矢量定姿确定旋转矩阵和姿态角,通过重投影验证同构子图并输出观测星的识别结果。

[0118] 匹配组中被标记的伴星与主星组成验证星对。利用验证星对在星敏感器坐标系下和天球坐标系下的方向矢量,由双矢量定姿法(TRAID)确定天球坐标系到星敏感器的旋转矩阵并解出姿态角。具体可参见Shuster M D和Oh S D的“Three-axis attitude determination from vector observations. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1981, 4(1):70~77”。再由旋转矩阵以及星敏感器的参数预测出现在视场范围内的导航星并计算出它们在像素坐标系下的坐标。将这些导航星逐一投影到星图中,并在一

定范围内搜索近邻的观测星。重投影原理图如图4所示。以每颗观测星为中心,若距其3像素范围内有且仅有一颗导航星投影到该区域,则认定该导航星与观测星匹配。统计匹配的观测星数量,若匹配不少于4颗观测星,则认定识别成功并输出全部识别结果。否则,在当前主星的候选星集合中删掉该最高票候选星,并选择另一颗最高票候选星构建同构子图。已知星图中共有观测星34颗,经重投影后24颗观测星被识别,其中选中的10颗最亮的观测星全部被识别。识别结果如表5所示。构建的同构最简一般子图以及选中的10颗观测星的识别结果如图5所示。

[0119] 表5识别结果

观测星	质心位置		灰度累计值	Catalog star			
	x	y		编号	赤经	赤纬	星等
1	1311.7	1921.0	4532	390	0.8080	0.6779	3.7
2	1050.1	1883.1	4204	397	0.8210	0.7148	2.9
3	1903.5	585.5	1966	509	1.0216	0.5565	2.9
[0120] 4	111.3	1292.7	1510	471	0.9727	0.8341	3.1
5	938.1	752.2	1364	518	1.0378	0.6983	3.0
6	711.6	1103.2	726	481	0.9826	0.7431	3.9
7	1417.4	592.5	558	521	1.0427	0.6247	4.0
8	1916.1	840.1	448	475	0.9788	0.5635	3.9
9	1200.7	1790.3	376	401	0.8347	0.6914	4.8
10	771.7	395.6	339	560	1.1122	0.7066	4.9

## [0121] 二、性能分析

[0122] 为了评估本发明方法的性能,采用仿真星图进行实验,参数如表6所示。星敏感器的角距测量不确定度为 $0.04^\circ$ 。仿真实验主要分析了星点位置噪声、星等噪声对算法的影响。

[0123] 表6星敏感器参数

参数名称	参数值
视场大小 FOV/ $^\circ$	$\Phi 17$
像元长度/ $\mu\text{m}$	5.5
[0124] 主点(u0,v0)/pixel	(1024,1024)
图像大小/pixel	2048 $\times$ 2048
极限星等	6.0Mv

[0125] 通过随机生成视轴指向的方式生成10000幅仿真星图。对于位置噪声,在星点真实位置上加上均值为0,标准差 $\sigma$ 从0到3像素变化的高斯噪声,同时加入均值为0,标准差 $\sigma$ 为0.4Mv的星等噪声。统计随机生成10000幅仿真星图的识别结果如图6所示,在 $\sigma=3$ 像素时,识别率约为96.5%。同理,对于星等噪声,在星点真实星等上加上均值为0,标准差从0到1星等变化的高斯噪声,同时加入均值为0,标准差 $\sigma=1$ 像素的星等噪声。统计随机生成10000幅仿真星图的识别结果如图7所示。在 $\sigma=1\text{Mv}$ ,识别率约为93.8%。对于假星,在仿真星图任意位置生成假星,假星的数量从1到4,并将假星随机插入到按亮度大小排序后的待识别观测星之列,同时加入均值为0,标准差 $\sigma$ 为0.4Mv的星等噪声,以及均值为0,标准差 $\sigma=1$ 像素的星等噪声。随机生成10000幅仿真星图的识别结果如图8所示。在假星数量为4时,识别率约

为96.3%。此外,本发明的平均运行时间约为12.4ms。综上所述,本发明对以星点位置噪声、星等噪声和假星均具有很好的鲁棒性。

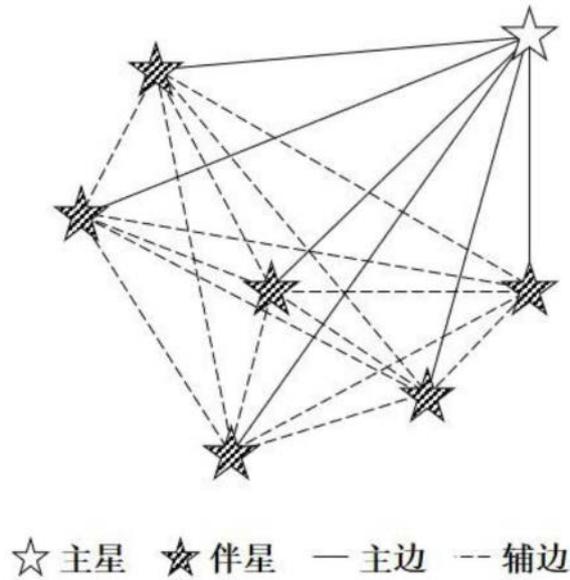


图1

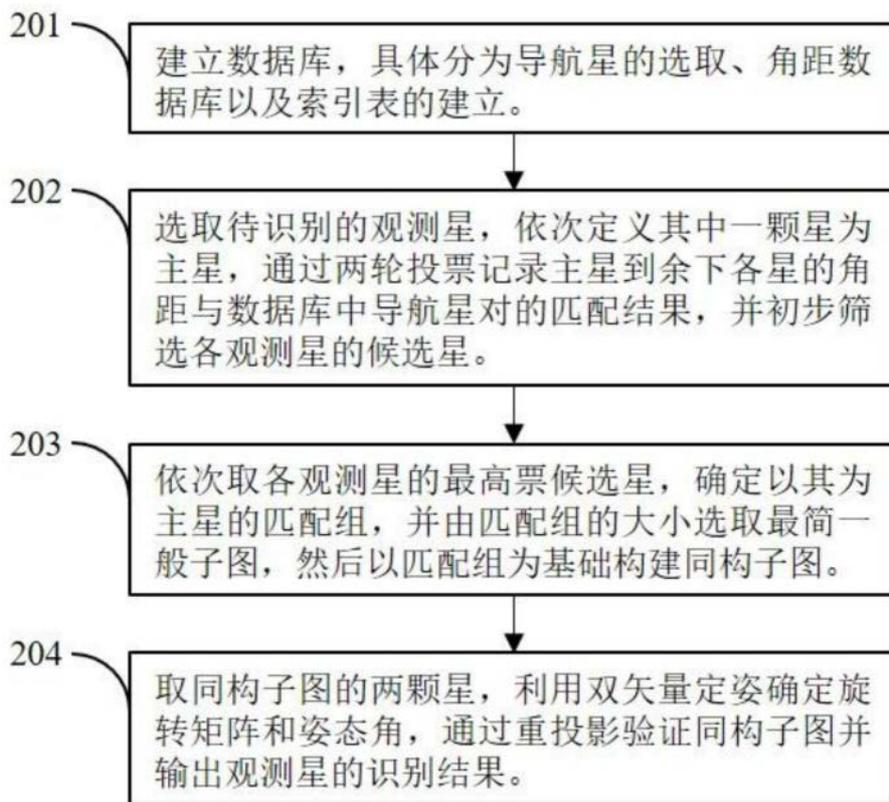


图2

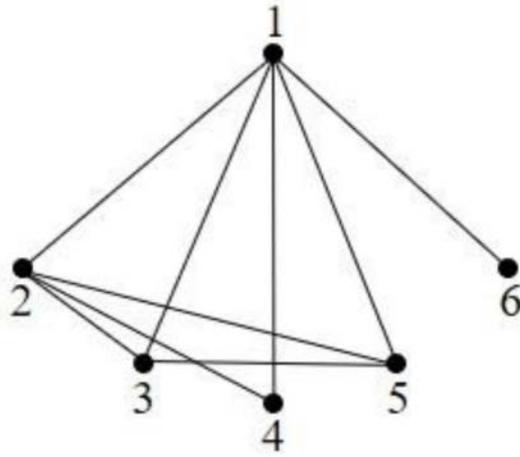


图3

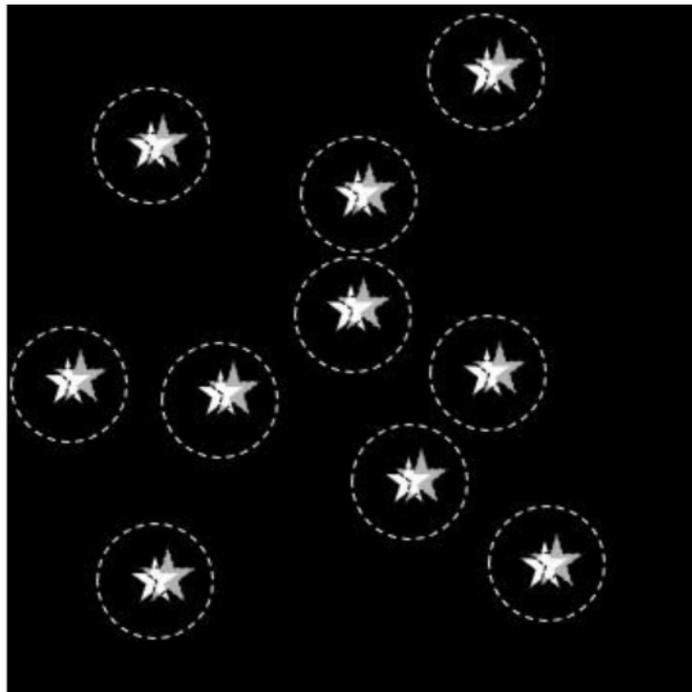


图4

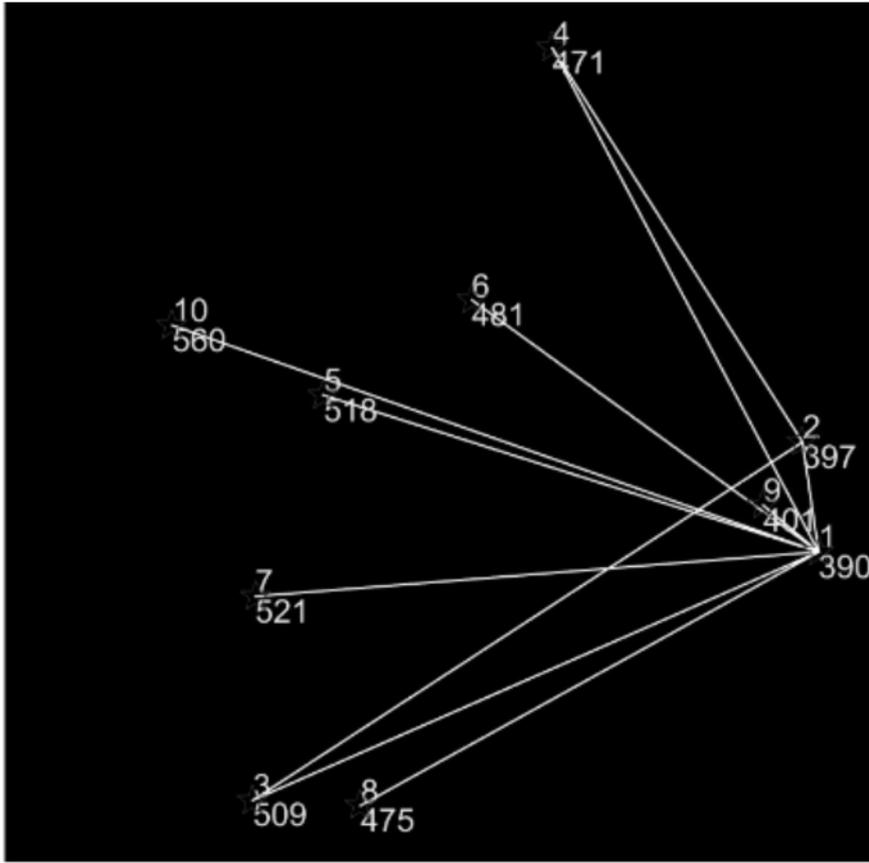


图5

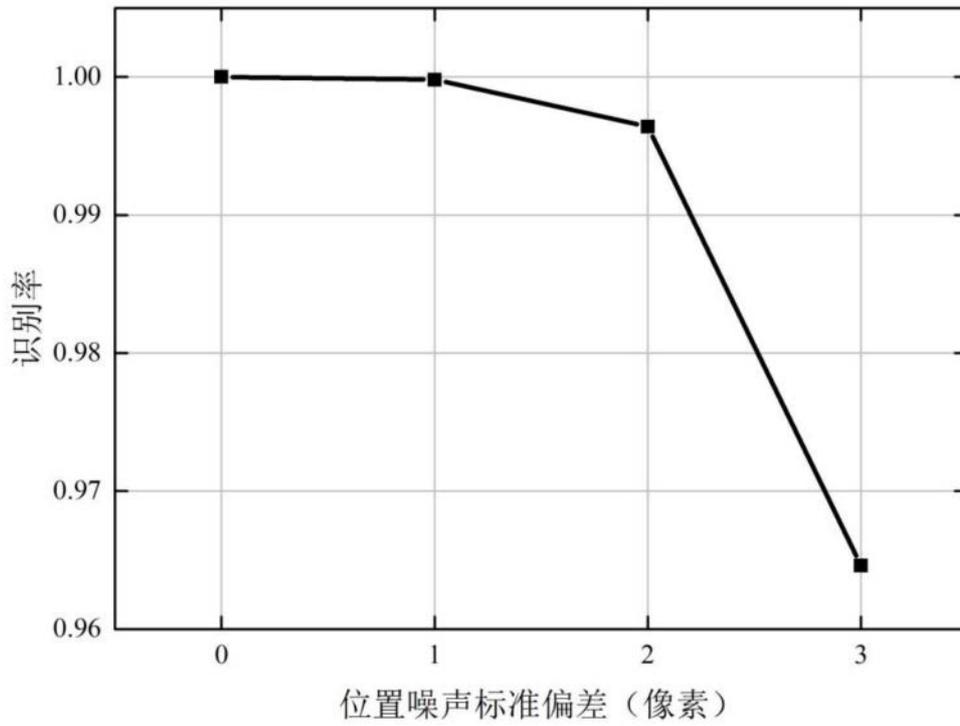


图6

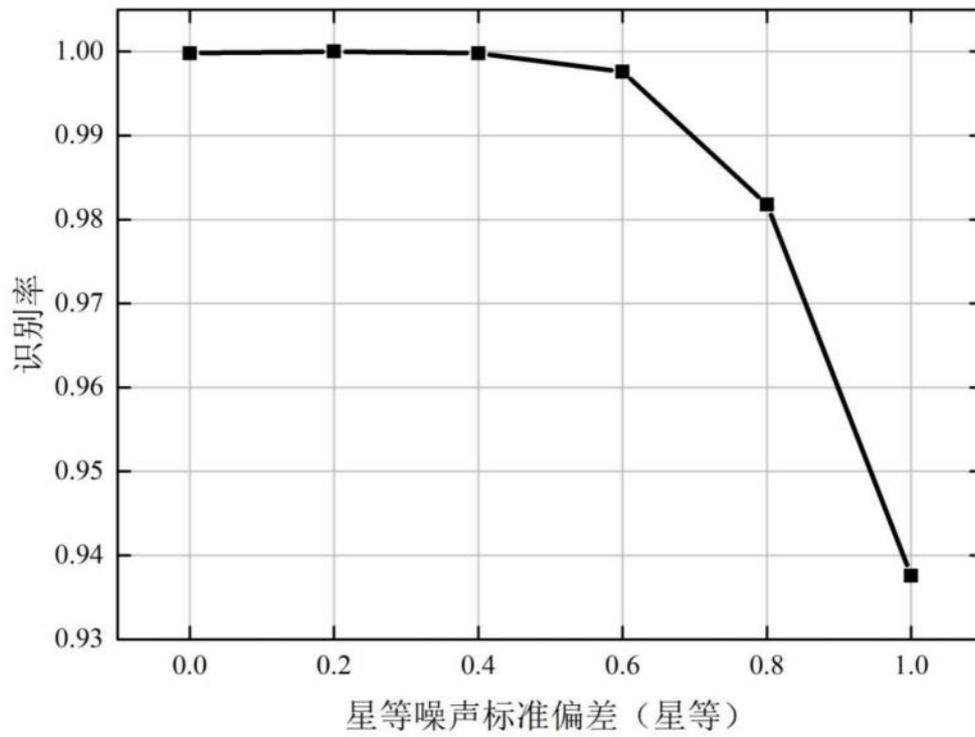


图7

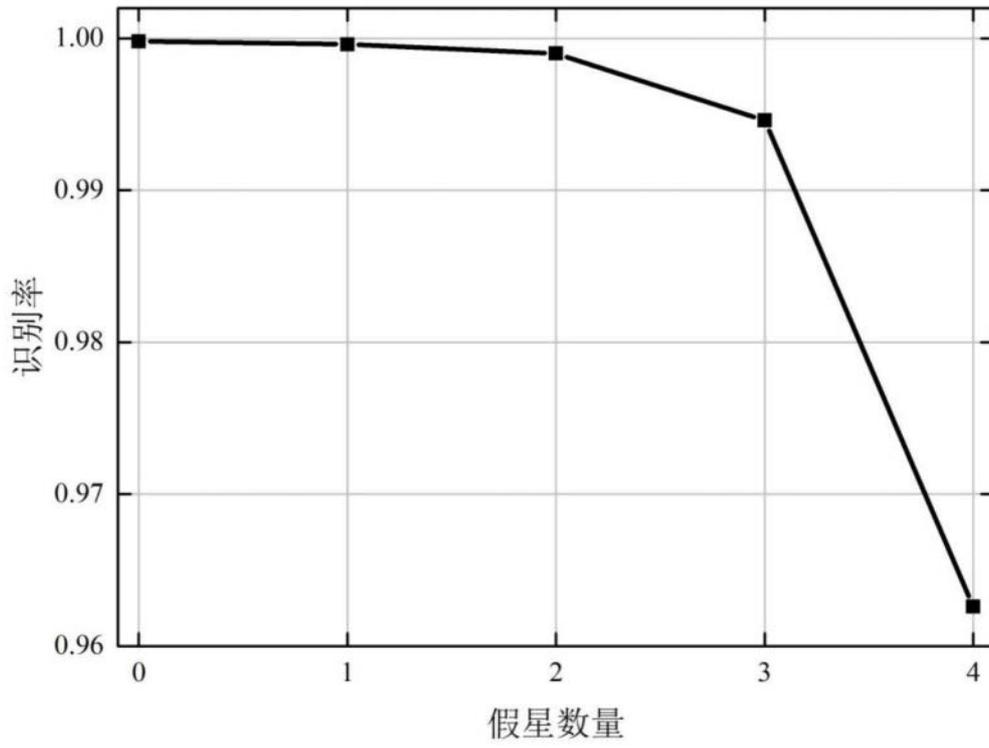


图8