

衡阳师范学院

毕 业 论 文



学生姓名 马欢 学 号 1721180059

学 院 物理与电子电气工程学院

专 业 电子信息科学与技术

题 目 天文导航中星图识别的研究

指导教师 宋毅 副教授(博士)

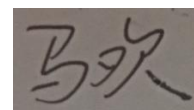
2022 年 4 月

毕业论文独创性声明

本人郑重声明：

本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。本论文除引文外所有实验、数据和有关材料均是真实的。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

作者签名：



日 期：2022 年 4 月 2 日

摘要：随着我国航天事业的发展，对于航天器的一些特定要求越来越高，而其中天文导航由于其特性，被确定为一种未来的一种导航形式。然而星敏感器又是天文导航系统中的重要组成部分，星图识别技术又是星敏感器中的关键部分，故需对其进行更深层次的探究。本文主要是对于天文导航系统中的星图识别做一个研究，主要是对传统的星图识别方法的一个改进，主要是对于星图信息做一个更加详细的特征提取，星图识别算法折衷选取适当数目的星像点进行星图识别，并用粗分类和精细匹配相结合的方式实现算法在识别率、实时性和存储空间大小三者之间的平衡。因为是不需要天文导航任何地面设备，所以其有自主导航的特征，不会因为电磁场而受到干扰，不会向外辐射能量，其隐蔽性好，定姿、定向、定位的精度高，定位误差与时间没有关系，已被广泛用于卫星、航天飞机导弹等航天器，具有广泛的应用。

关键词：天文导航，星敏感器，星图识别，特征提取

Abstract: With the development of China's aerospace industry, some specific requirements for spacecraft are higher and higher, and astronomical navigation is determined as a future navigation form because of its characteristics. However, star sensor is an important part of astronomical navigation system, and star map recognition technology is the key part of star sensor, so it needs to be explored in a deeper level. This paper mainly studies the star map recognition in the astronomical navigation system, mainly an improvement of the traditional star map recognition method, mainly a more detailed feature extraction of the star map information. The star map recognition algorithm compromises the selection of an appropriate number of star image points for the planet map recognition, and realizes the improvement of the algorithm in the recognition rate by the combination of rough classification and fine matching Balance between real-time and storage space. Because it does not need any ground equipment for astronomical navigation, it has the characteristics of autonomous navigation. It will not be disturbed by electromagnetic field and will not radiate energy. It has good concealment, high accuracy of attitude determination, orientation and positioning, and the positioning error has nothing to do with time. It has been widely used in satellites, space shuttles, missiles and other spacecraft.

Keywords: Celestial Navigation, Star Sensor, Stellar Map Recognition, Feature Extraction

目录

1 绪论	7
1.1 研究背景及意义	7
1.2 星图识别原理	7
1.3 国内外现状发展	7
2 星图识别理论基础	8
2.1 符号说明	8
2.2 星敏感器基本概念	8
2.3 恒星和星表	9
2.4 坐标系	10
3 星图识别算法设计	12
3.1 星图特征提取	13
3.2 星图识别	15
3.3 星图识别结果分析	17
4 星图识别算法的性能评价	19
4.1 算法性能评价	19
5 总结与展望	22
5.1 论文总结	22
5.2 论文展望	23
参考文献	24
致谢	25

1 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,我国航天技术的蓬勃发展,探索太空的能力正在不断增强。从“东方红”卫星到“神州”飞船,再到后来的“嫦娥”“天宫”等等,标志着我国航天事业从“无”到“有”,从“有”到“国际领先”,已被用于卫星、航天飞机、远程弹道导弹等航天器等等诸多活动中越来越多地直接地、间接地被应用在各种地方。中国航天事业的飞速发展也标志着中华民族在复兴之路的稳步前行。

然而,航天任务一次比一次更艰巨,对航天技术的要求也越来越高。在天文导航中,为实现对航天器高可靠、高精度的定姿定位,星敏传感器需要解决两个关键问题。一是精确自主的星图识别。只有在完成准确的星图识别的情况下,才能进一步对航天器的定姿定位;二是设计高效可靠的位置求解算法。在获得恒星的天文信息后,需要利用测量数据求解当前航天器的位置信息。由于定位的实时性和精度要求高,因此设计高效可靠的位置求解算法在天文导航中十分关键。

1.2 星图识别原理

传统的星图识别方法具有一定的缺陷,方法相对而言比较简单,但是却占用了很大的空间,算法识别率较低且实时性较差。这对航天器有限的存储和计算资源带来很大的压力。需要对星图中的星点信息进行更为精细的特征提取,构建更高层次的特征,提高星图识别算法的实时性和降低误匹配率。因此,为克服传统星图识别方法的缺点,我们对星图信息进行了更加细致的特征提取。星图识别算法根据需要选取适当数目的星像点实现星图识别,并采用粗分类和精细匹配相结合的方式实现算法在识别率、实时性和存储空间大小三者之间的平衡。结果表明,所提算法能够准确识别题中所给的星像点,并具有容忍一定噪声误差能力。

1.3 国内外现状发展

本课题的研究任务是天文导航中的星图识别研究,星敏传感器研究始于20世纪50年代,随着我国航天技术的不断发展,航天能力的增强。经过多年的发展和积累,国内也已经研制出星敏传感器的各种产品,但是相较于外国还是有很大的差距,至今为止,世界上已经有许多国家研制出各种卫星,导弹,航天飞机等,而这些他也是星敏传感器的一些衍生物。对于航天事业的蓬勃发展,这种高精度的姿态测量仪器,星敏传感器将会是未来发展趋势的必要。总的来说,未来发展趋势主要有微小型星敏传感器和高精度敏感器将会

是未来的研究的重点方向,国内相较于国外这方面的技术是不是特别成熟,二者之间仍然存在较大的差距。

2 星图识别理论基础

姿态测量是航天方面的关键部分,姿态测量能够使得航天器等一系列航天物能正确的变换轨道和飞行,更能够使得通信方面有更高层次的观测,保证能够过够在太空中能够正确完成各种任务。

2.1 符号说明

P_i	恒星在天球坐标系中的坐标	M	特征矩阵
α_i	赤经	O'	感光面中心
δ_i	赤纬	α_i	恒星投影点到感光面中心的距离
f	投影中心到感光面的距离	R	天球假想半径
O	投影中心		

2.2 星敏传感器基本概念

星敏传感器实现航天器能够自主进行姿态测量的关键部件,是通过观察太空中的恒星来实现高精度姿态测量。星敏传感器坐标系参见图 2.2.1。

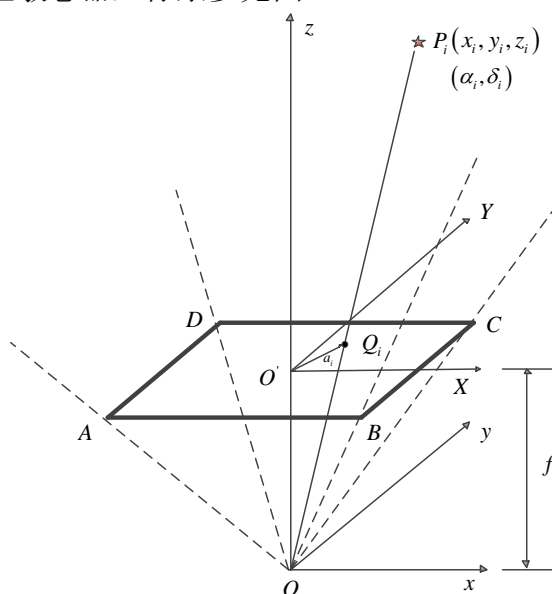


图 2.2.1 星传感器坐标系、图像坐标系及前视投影成像示意图

下面，对星传感器的工作原理进行简单描述。

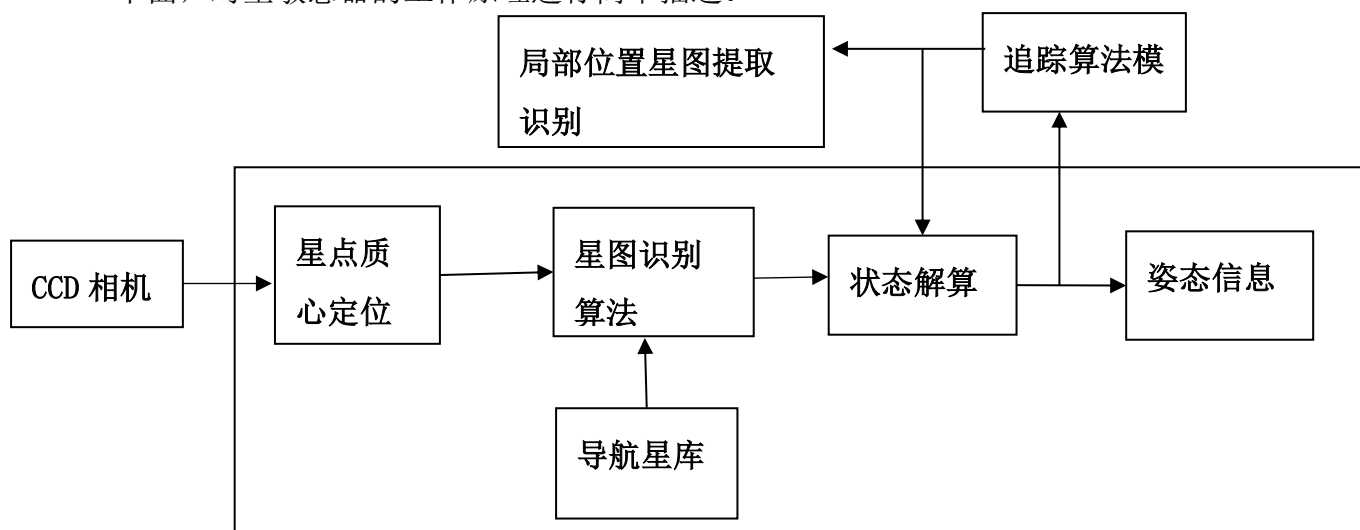


图 2.2.2 星传感器的工作原理

如图 2.2.2 所示，一般而言，星传感器至少包含两种工作模式，即跟踪(Tracking)模式和初始姿态捕获(Initial attitude Establishment)模式。在星传感器进入工作状态的初始时刻或者由于故障遇到姿态丢失(Lost in Space)的情况下，星传感器转入初始姿态捕获模式。在这个阶段，由于完全没有先验的姿态信息，需要进行全天星图识别。一旦获得初始姿态，星传感器即进入跟踪模式。全天自主的星图识别是星传感器技术中的一项关键技术，也是研究的重点和难点。

天文导航中，通常利用天体传感器来实现对自然天体的观测，根据所观测得到的天体的方位信息进行自主定姿定位导航。匹配的准确性是利用星传感器对姿态定位的核心和关键，因此星图识别在天文导航中具有十分重要的研究意义。

2.3 恒星和星表

2.3.1 恒星

恒星的位置是天球球面上的投影点。赤经和赤纬可以表示恒星的位置信息对于天文导航而言，感兴趣的信息主要是恒星的位置和星等。恒星能自行发光，这是它的本质特征。对天文导航而言，恒星可以看成是位于无穷远处的，近似静止不动的，具有一定光谱特性的点光源。

2.3.2 星表

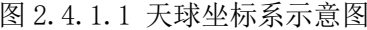
将星空中恒星的相关数据，按不同的需求编制而成的表册，称为星表。星表是星图识别的主要依据，也是姿态确定的基准。星敏感器通过对恒星的观测和识别，实现航天器三轴姿态的测量，因此，恒星的信息是必不可少的。为了加快导航星的检索速度，通常需要对星表进行划分，星表的划分对提高星图识别及星跟踪效率具有重要作用。星敏感器所利用的恒星信息主要包括恒星的位置（赤经、赤纬坐标）和亮度。星敏感器的存储器会存储一定亮度范围的恒星的基本信息，这种简易的星表通常称为导航星表（Guide Star Catalogue）。

2.4 坐标系

2.4.1 坐标系及理论基础

首先，我们要对这个问题进行理论分析，然后根据已知参数 $f, \alpha_i, (\alpha_i, \delta_i) (i=1, 2, 3)$ 等建立解算 D 点在天球坐标系的位置信息的数学模型，并给出具体的求解方法。

目前来看，航天飞行器的探索范围依然在太阳系内，因此恒星离天球坐标系原点的距离远远大于飞行器与天球坐标系原点的距离。在这种情况下，对于恒星来说，天球坐标系的原点几乎与星敏感器坐标系的原点重合。也就是说，将天球坐标系的原点平移至星敏感器坐标系的原点时，恒星的赤经和赤纬的变化极小，可近似于不变。以距离太阳系最近的比邻星为例，该星距太阳系 $R_b = 4 \times 10^{16}m$ ，太阳系半径 $R_s = 6 \times 10^{12}$ ，则星敏感器在太阳系内，以上假设测量所带来的最大角度误差为 $\Delta \alpha = \arctan \frac{2R_s}{R_b}$ 。事实上，人类的大部分航空航天活动范围目前还局限于地球附近，而地球在比邻星的张角仅仅为 $\alpha_E = \arctan \frac{2 \times 6371 \times 10^3}{R_s} = 1.6 \times 10^{-10}$ ，该误差几乎可以忽略不计。因此，在下面的问题解答中，为了便于分析，将天球坐标系原点与星敏感器坐标系原点视为重合[5]，如图 2.4.1.1 所示。


$$\begin{cases} x_d = R \cos \delta_D \cos \alpha_D \\ y_d = R \cos \delta_D \sin \alpha_D \\ z_D = R \sin \delta_D \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R = \sqrt{x_D^2 + y_D^2 + z_D^2} \\ \alpha_D = \arctan \frac{y_d}{x_d} \\ \delta_D = \arcsin \frac{z_D}{R} \end{cases} \quad (2)$$
$$\begin{cases} x_i = R \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ y_i = R \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ z_i = R \sin \alpha_i \end{cases} \quad (3)$$
$$\arccos\left(\frac{x_D x_i + y_D y_i + z_D z_i}{\sqrt{x_D^2 + y_D^2 + z_D^2} \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}\right) = \arctan\left(\frac{a_i}{f}\right) \quad (4)$$
$$x_D x_i + y_D y_i + z_D z_i = R^2 \frac{f}{\sqrt{f^2 + a_i^2}} \quad (5)$$

将方程(5)转化为矩阵形式求解, 可得:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^2 \frac{f}{\sqrt{f^2+a_1^2}} \\ R^2 \frac{f}{\sqrt{f^2+a_2^2}} \\ R^2 \frac{f}{\sqrt{f^2+a_3^2}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

经过行列式变换后, 可得:

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{y_1}{x_1} & \frac{z_1}{x_1} \\ 0 & 1 & \frac{\left(\frac{z_2}{x_2} - \frac{z_1}{x_1}\right)}{\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}} \\ 0 & 0 & \frac{\left(\frac{z_3}{x_3} - \frac{z_1}{x_1}\right) - \left(\frac{z_2}{x_2} - \frac{z_1}{x_1}\right) \frac{\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_3}{x_3} - \frac{y_1}{x_1}}}{\frac{y_3}{x_3} - \frac{y_1}{x_1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\alpha_1) \\ \frac{f(\alpha_2) - f(\alpha_1)}{\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}} \\ \frac{f(\alpha_3) - f(\alpha_1)}{\frac{y_3}{x_3} - \frac{y_1}{x_1}} - \frac{f(\alpha_2) - f(\alpha_1)}{\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}} \frac{\frac{y_3}{x_3} - \frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

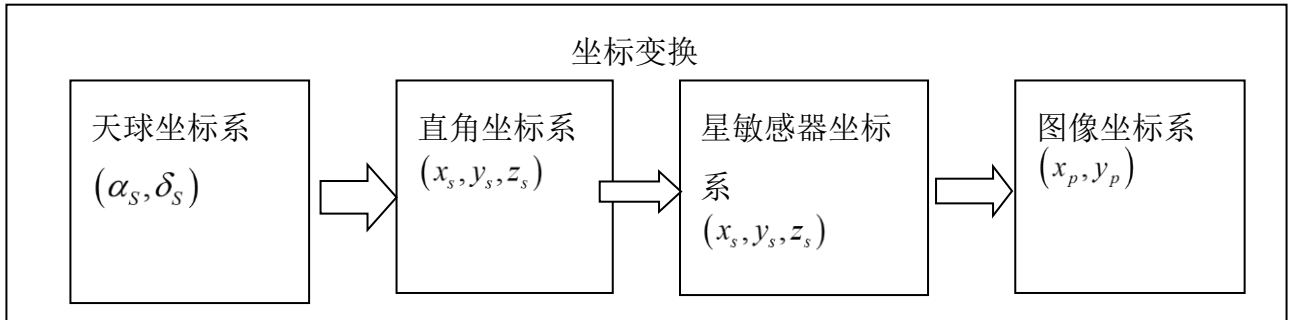
其中 $f(a_i) = R^2 \frac{f}{x_i \sqrt{f^2+a_i^2}}$ 。故可求得 D 的坐标:

$$z_D = \frac{\left(\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}\right)(f(\alpha_3) - f(\alpha_1)) - \left(\frac{y_3}{x_3} - \frac{y_1}{x_1}\right)(f(\alpha_2) - f(\alpha_1))}{\left(\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}\right)\left(\frac{z_3}{x_3} - \frac{z_1}{x_1}\right) - \left(\frac{y_3}{x_3} - \frac{y_1}{x_1}\right)\left(\frac{z_2}{x_2} - \frac{z_1}{x_1}\right)} \quad (8)$$

$$y_D = \left(\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}\right)(f(\alpha_2) - f(\alpha_1)) - \left(\frac{y_2}{x_2} - \frac{y_1}{x_1}\right)\left(\frac{z_2}{x_2} - \frac{z_1}{x_1}\right)z_D \quad (9)$$

$$x_D = f(\alpha_1) - \frac{z_1}{x_1}z_D - \frac{y_1}{x_1}y_D \quad (10)$$

其中(8)(9)(10)式为 D 点坐标的闭式表达式, 根据(8)(9)(10)即可进一步求得 D 在天球坐标系中的赤经和赤纬, 即 $(\alpha_D, \delta_D) = \left(\arctan\left(\frac{y_D}{x_D}\right), \arcsin\left(\frac{z_D}{R}\right)\right)$ 。



3 星图识别算法设计

星图识别是星点信息别提取时惊醒特征匹配, 所以图像质心的选取就变的非常关键。质心提取算法会对识别算法产生作用, 星图特征提取方法, 基于坐标变换构建图像坐标系, 以星像点坐标作为特征, 构建星图特征库; 然后基于特征图库, 设计了星图识别算法, 最后进行了算法的性能评估。

由于星图识别的 8 幅星图只有星像点在图像坐标系中的位置信息，所以利用星的分布、星与星的夹角、星像点与星像点之间的距离等参数进行特征提取。为了在识别率、识别算法实时性和存储空间之间取得一个平衡，所设计的星图识别算法选取适当数量的星像点来做星图识别。此外外，星图识别算法还具有容忍噪声的能力，以及较强的鲁棒性。

3.1 星图特征提取

星图特征提取方法是基于坐标变换构建图像坐标系，以星像点坐标作为特征，构建星图特征库；然后基于特征图库，设计了星图识别算法，最后进行了算法的性能评估。

3.1.1 图像坐标系的构建

星敏感器无论处于任何方位，其都会正对着天球的某一片区域，这里称之为星敏感器感知星域，简称感知星域。由星敏感器的视轴所指向的赤经、赤纬和视轴的滚转角，可将感知星域投影到星图中。星图之间的识别匹配应该对旋转角度和平移量不敏感，因此，需要按照一定的规则建立统一的图像坐标系。图像坐标系构造规则如下：

- (1) 选择星图中距离中心点最近的一颗星作为主星，记为 O_c 。
- (2) 选择距离主星 O_c 最近的一颗星作为伴星，记为 O'_c 。
- (3) 以主星 O_c 作为坐标原点，向量 $\overrightarrow{O_c O'_c}$ 的方向作为 x 轴，以垂直于向量 $\overrightarrow{O_c O'_c}$ 的方向作为 y 轴建立直角坐标系 $x^{O_c}y$ ，称为图像坐标系。

3.1.2 星图坐标特征提取

以星图“xingtu01”为例，其像素图如图 3.1.2.1 所示，其经过转换后，星像点在图像坐标系 $x^{O_c}y$ 中的坐标如图 3.1.1.2 所示。取除原点外的所有星像点在图像坐标系中的坐标，并向上取整得到星图的坐标特征，并形成矩阵 M ，其排列顺序为离原点坐标的距离由近到远排列。

$$M = \begin{bmatrix} [23], [32], [60], [-158], [48], [-159], [-170] \\ [0], [88], [115], [44], [-166], [125], [-32] \\ [185], [-77], [-97], [-225], [47], [-6], [-337] \\ [-136], [-265], [-263], [-168], [-334], [-371], [-203] \end{bmatrix} \quad (11)$$

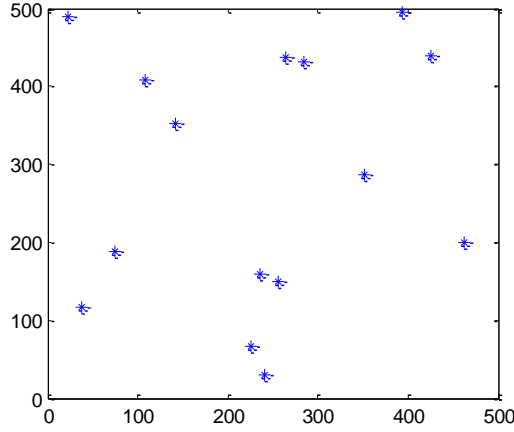


图 3.1.2.1 星图“xingtu01”像素示意图

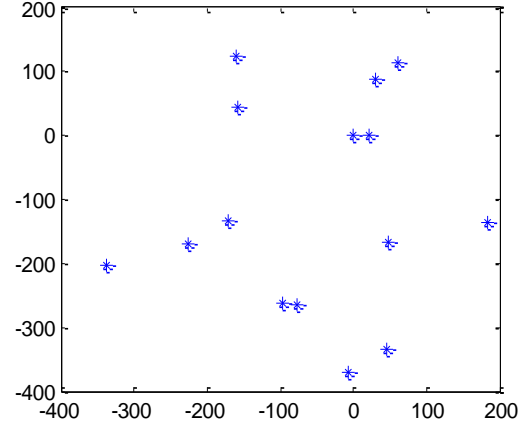


图 3.1.2.2 星图“xingtu01”图像坐标示意图

取简易星表中的任意一颗星，记为 S ，以星 S 为中心，选取与星 S 的地心夹角小于 10° 的圆形星域作为感知星域。由于所要识别的星图视场为 $12^\circ \times 12^\circ$ ，像素数为 512×512 ，根据等比例的换算，将感知星域投影到视场为 $16^\circ \times 16^\circ$ ，像素数为 683×683 的星图中。

设星 S 的赤经和赤纬分别为 α_s 和 δ_s ，则星 S 的在天球坐标系中的直角坐标可表示为 (x_s, y_s, z_s) ，其中，

$$\begin{cases} x_s = R \cos \alpha_s \cos \delta_s \\ y_s = R \sin \alpha_s \cos \delta_s \\ z_s = R \sin \alpha_s \end{cases} \quad (12)$$

星 S 在视轴指向赤经和赤纬分别为 α_s 和 δ_s ，视轴滚转角为 0 的星敏感器坐标系中的坐标可表示为 (x_s, y_s, z_s) ，由星 S 的空间直角坐标系到星敏感器坐标系需要经过坐标系旋转，绕 Z 轴旋转角度为 α_z ，绕 Y 轴旋转角度为 β_y ，绕 X 轴旋转角度为 φ_x 。其中，

$$\begin{cases} \cos \alpha_z = \frac{x_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2}} \\ \sin \alpha_z = \frac{y_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2}} \\ \beta_y = \arccos \frac{z_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}} \\ \varphi_x = 0 \end{cases} \quad (13)$$

坐标 (x_s, y_s, z_s) 到坐标 (x_t, y_t, z_t) 的变换矩阵为 $R_x R_y R_z$ 。其中，

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \beta_y & 0 & -\sin \beta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_y & 0 & \cos \beta_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & 0 & \sin \alpha_z \\ -\sin \alpha_z & 1 & \cos \alpha_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\text{即 } \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_y & 0 & -\sin \beta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_y & 0 & \cos \beta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & 0 & \sin \alpha_z \\ -\sin \alpha_z & 1 & \cos \alpha_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (17)$$

星 S 由星敏感坐标系投影到图像坐标系需要去掉 Z 轴分量，等比缩放，并再次经过坐标轴旋转。旋转规则参照前面图像坐标系的构建。假设旋转角度为 γ ，星 S 在图像坐标系的坐标为 (x_p, y_p) ，则

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \frac{256}{R * \arctan(6^\circ)} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} \quad (18)$$

至此，星 S 由天球坐标系的坐标 (α_s, δ_s) 到图像坐标系的坐标 (x_p, y_p) 转换已完成。坐标转换过程如图 3.1.2.3 所示

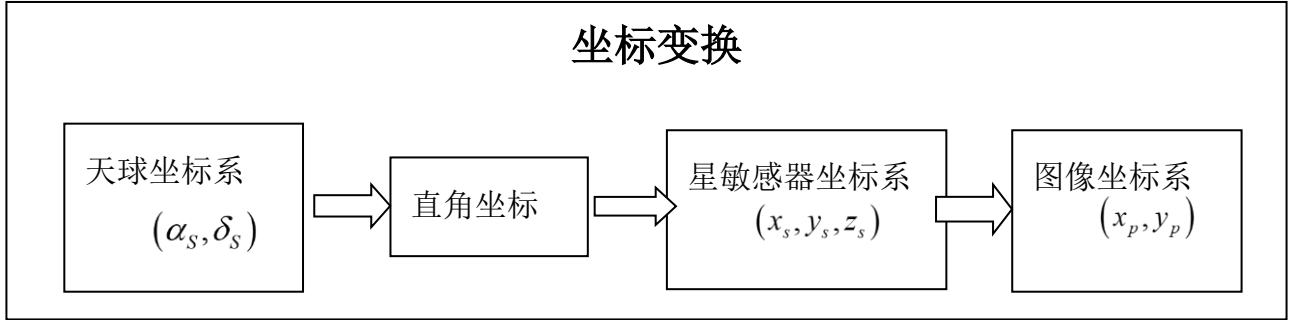


图 3.1.2.3 坐标转换示意图

经过坐标变换之后，同理于上述“xingtu01”星图特征提取，可得到以星 S 为中心，地心夹角小于 10° 的圆心星域的特征矩阵。该特征矩阵称为星 S 的星图特征矩阵。提取简易星表中所有星的星图特征矩阵构成星图特征库。

3.2 星图识别

(1) 星图分类

为了提高识别算法的实时性，减少星图匹配的计算量，可以对星图特征库做一个粗分类，形成多个星图特征子库。在识别星图时，只要待识别的星图具有某一特征，即将其快速归为某个星图特征子库，与星图特征子库中的特征矩阵去比较，减少不必要的匹配计算。若该星图在其归属的星图特征子库中没有匹配上，则进行全星图特征库的遍历匹配。

星图分类的方法为：首先，将星图映射到图像坐标系中，取与视轴夹角为 6° 的圆形星图区域，统计该圆形区域各个象限内的星像点个数。如图 3.2.1 所示，该星图从第一象限到第四象限的星像点数统计结果为 (2, 3, 2, 1)。其次，统计结果大于 2 以二进制 1 表

示，否则以二进制 0 表示。则 (2, 3, 2, 1) 可表示为 0100。这样就可以将星图分为 16 类，通过星图的二进制编号就可找到其所属的类。

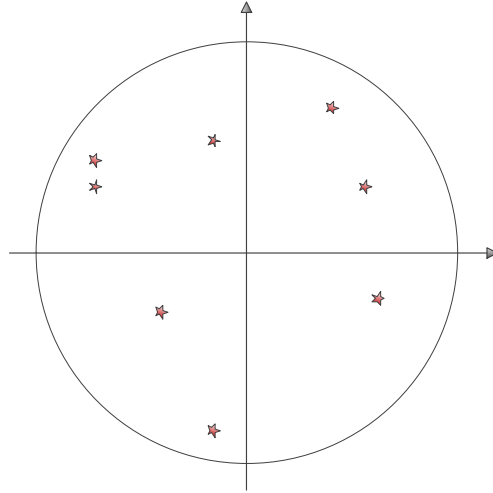


图 3.2.1 夹角为 6° 的圆形星图示意图

将星图特征库中的星图按照同样的分类方法可分为 16 个星图特征子库。每个子库中的特征矩阵数目见表 3.2.2。

表 3.2.2 子库特征矩阵数目表

库码表	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
数	941	445	622	285	398	352	281	107
库码表	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
数	217	393	232	136	241	74	123	61

(2) 星图匹配

将所要识别的星图经过特征提取后的特征矩阵与星图特征库中所有特征矩阵一一比对，算法如下：

将识别星图进行分类，分类后将识别星图放入其所归属星图特征子库去比对。

设置阈值 ε ，计数 $\text{count}=0$ ；

将识别星图特征矩阵的每一列向量 $\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}$ 与星图特征子库中星 S 的星图特征矩阵的每一列向量 $\begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}$ 做减法运算得到向量 $\begin{bmatrix} A-C \\ B-D \end{bmatrix}$ 。若 $\sqrt{(A-C)^2 + (B-D)^2} < \varepsilon$ ，则认为识别星图与星 S 的星图有匹配的星像点， $\text{count}=\text{count}+1$ 。遍历完识别星图的特征矩阵与星 S 的星图特征矩阵后的 count 值作为识别星图与星 S 的星图的匹配度遍历星图特征子库中的所有特征矩阵，取最大的 count 值 c_{\max} ，若 $\frac{c_{\max}}{\text{识别星图特征矩阵列数}} > 0.5$ ，则认为识别星图与 c_{\max} 对应的星 S' 的星图匹配，并且距离识别星图中心点最近的星像点 0 即为星 S' ，否则识别星图与全星图特征库进行比对。只要识别的星像点 0 和星 S' 点的对应关系，就能得到星图中其他星像点对应的恒星。

3.3 星图识别结果分析

利用所设计的星图识别算法，对 8 副星图进行了识别，识别结果如图 3.3.1 所示

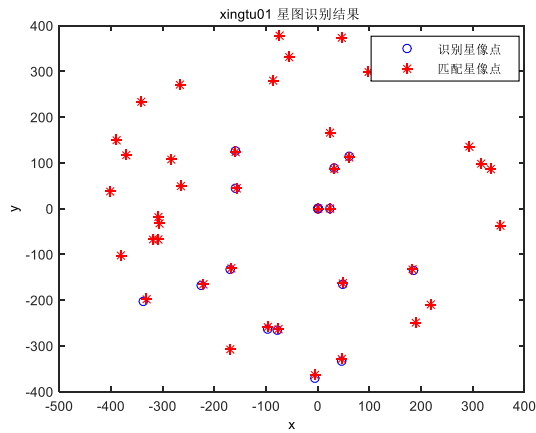


图 3.3.1a “xingtu01” 星图识别结果

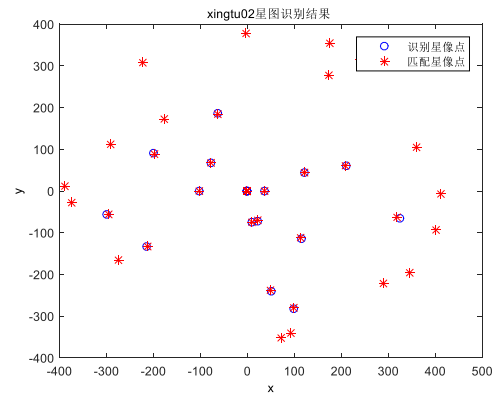


图 3.3.1b “xingtu02” 星图识别结果

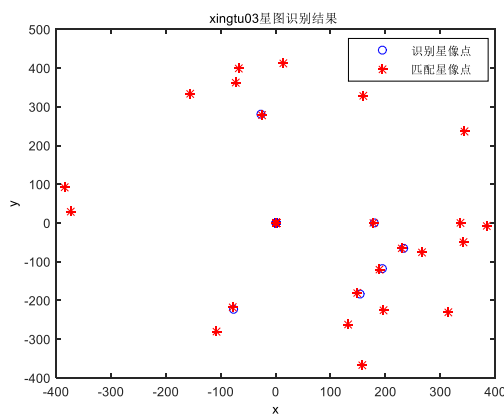


图 3.3.1c “xingtu03” 星图识别结果

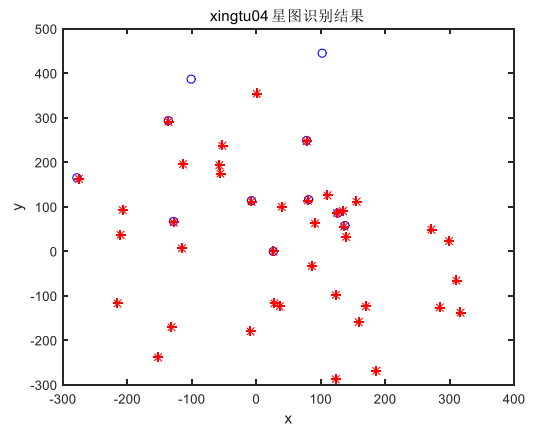


图 3.3.1d “xingtu04” 星图识别结果

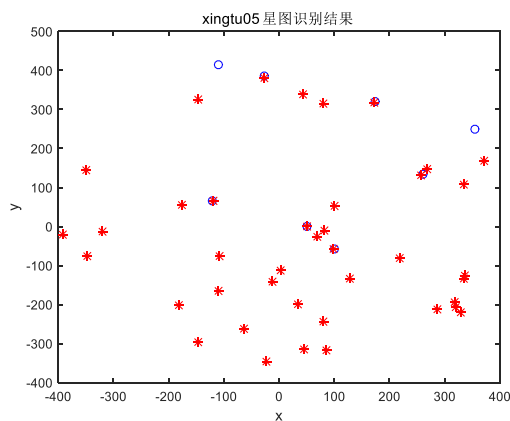


图 3.3.1e “xingtu05” 星图识别结果

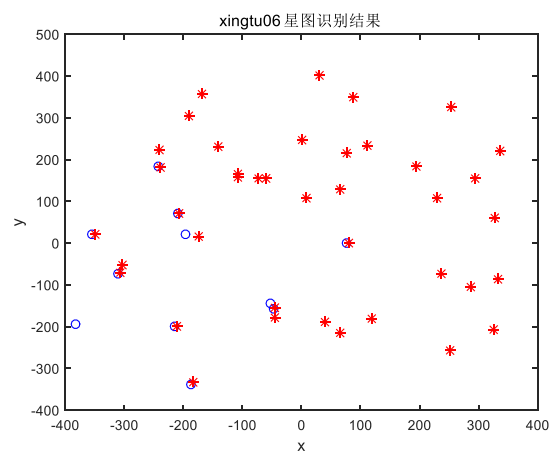


图 3.3.1f “xingtu06” 星图识别结果

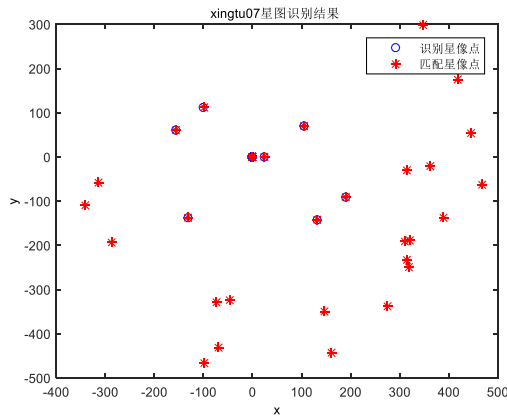


图 3.3.1g “xingtu07” 星图识别结果

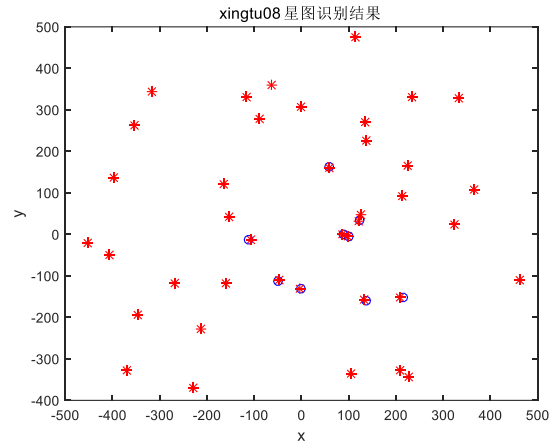


图 3.3.1h “xingtu08” 星图识别结果

图 3.3.1 a-h 展示的是 8 副星图的匹配结果，从图中可以看出，算法的匹配精度非常高，能够确定星敏感器内每颗星对应的实际恒星。由于选择简易星表中部分恒星进行匹配，存在某些边缘星点没有匹配对象。事实上在实际测量中，只需要选择 3 颗恒星即可定位。因此选择识别率高的少量恒星能够提高测量实时性，和测量精度，比全面识别更有实际意义。

表 3.3.2 给出了 8 副星图中星像点对应的恒星编号，根据识别出的恒星和星敏感器的测量数据，即可得到航天器的位置信息。“xingtu07”和“xingtu08”只进行了部分识别，这有利于提高算法的实时性，而不影响实际测量。

表 3.3.2 星像点对应的恒星编号表

xingtu01	编号	xingtu02	编号	xingtu03	编号	xingtu04	编号
A01	1670	B01	518	C01	1864	D01	none
A02	1477	B02	472	C02	1942	D02	none
A03	1502	B03	537	C03	1825	D03	3364
A04	1631	B04	428	C04	1941	D04	3275
A05	1603	B05	491	C05	1943	D05	3421
A06	1453	B06	469	C06	1900	D06	3319
A07	1432	B07	482	C07	1722	D07	3283
A08	1492	B08	503			D08	3370
A09	1488	B09	478				
A10	1648	B10	499				
A11	1646	B11	547				

A12	1566	B12	460				
A13	1688	B13	507				
A14	1655	B14	556				
A15	1505	B15	447				
		B16	479				
xingtu05	编号	xingtu06	编号	xingtu07	编号	xingtu08	编号
E01	none	F01	1670	G21	1631	H01	1610
E02	1150	F02	1477	G22	1603	H03	1675
E03	1017	F03	1502	G24	1692	H05	1586
E04	1033	F04	1631	G29	1648	H06	1610
E05	1014	F05	1603	G31	1566	H08	1681
E06	1223	F06	1692	G32	1688	H09	1606
E07	1008	F07	1488	G33	1655	H10	1670
E08	1208	F08	1492			H13	1631
E09	none	F09	1646			H14	1603
		F10	1566				
		F11	1655				
		F12	1505				

4 星图识别算法的性能评价

4.1 算法性能评价

星图识别的性能与星敏感器的性能有很大关系，为了便于分析，我们以附件中视场为 $12^{\circ} * 12^{\circ}$ ，像素数为 $512 * 512$ 的星敏感器所得到的星图为标准，仿真分析星图识别算法的性能。主要从三个方面考量算法性能，即识别率，计算实时性和存储空间大小。

4.1.1 识别率

星图特征库构造的视场大小和星图匹配时的阈值 ϵ 这两个参数的设置可能会影响到算法性能，比如构造星图特征库时，视场大小的选择会影响感知星域内星的数量，进而影响到星图特征库所需存储空间的大小和星图识别的计算量。因此在星图识别之前需要对这两个参数进行调校以使得算法具有最佳的性能。

(1) 星图特征库构造的视场大小调校

在仅考虑星像点误差的情况下，仿真星图特征库构造的视场大小对星图识别率的影响。设置星像点横纵坐标最大像素误差为 2 和 4 两种情况，星图匹配时的阈值 ε 设为 10。仿真结果如图 4.1.1.1 所示，随着视场大小的增加，识别率有所提高，但在视场大小为 $16^\circ * 16^\circ$ 之后，视场大小的增大对识别率的提升有限。因此，星图特征库构造时的视场大小设为 $16^\circ * 16^\circ$ 。

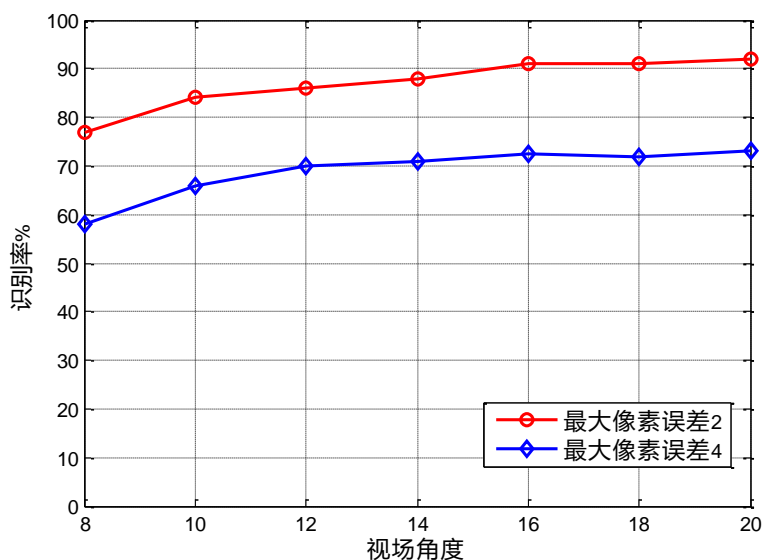
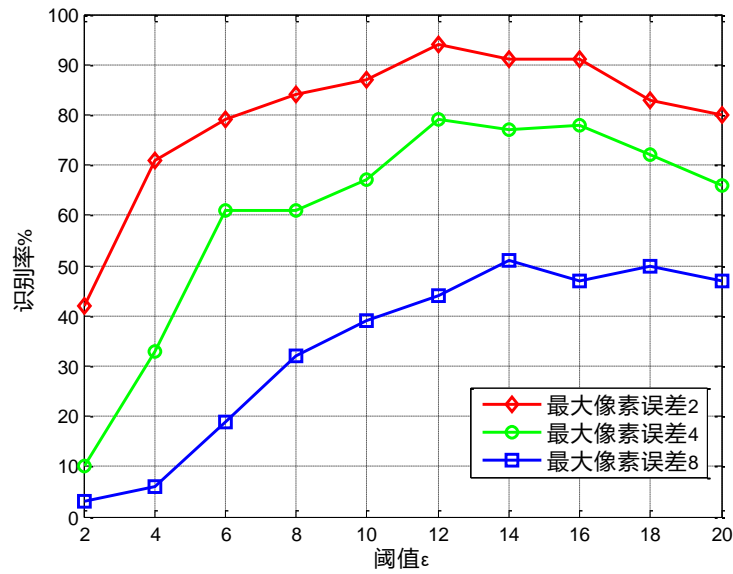


图 4.1.1.1 星图特征库构造的视场大小对星图识别率的影响

(2) 星图匹配阈值 ε 调校

在仅考虑星像点误差的情况下，仿真星图匹配阈值 ε 对星图识别率的影响。设置星像点横纵坐标最大像素误差为 2、4 和 8 三种情况。仿真结果如图 4.1.1.2 所示，过大或过小的星图匹配阈值 ε 都会降低星图识别率。当最大像素误差达到 8 时，识别率已经比较低，说明此时的像素误差已远超过算法所能容忍的误差，对阈值 ε 的选取不具有参考价值。当最大像素误差较小时，阈值 ε 取 12 附近有最高的识别率。因此，星图匹配阈值 ε 设为 12 最佳。

图 4.1.1.2 星图匹配阈值 ϵ 对星图识别率的影响

(3) 星图识别率结果

导致星图识别错误的误差来源主要有两个，一个是星像点质心中心的像素点误差，这里我们用星像点横纵坐标最大像素误差来表示；另一个是星像点的识别错误，“假星”和“缺失星”会导致多出或者缺失星像点。我们在算法最佳参数设置下，对两种误差联合仿真分析，考察算法的识别率。仿真结果如图 4.1.1.3 所示，可以看到在星像点识别错误数不大于 1 个，最大像素误差不大于 3 个的条件下，我们的算法识别率可达 80% 以上。而当星像点识别错误大于 1 个时，识别率显著下降。所以星像点识别错误对星图识别影响非常大。

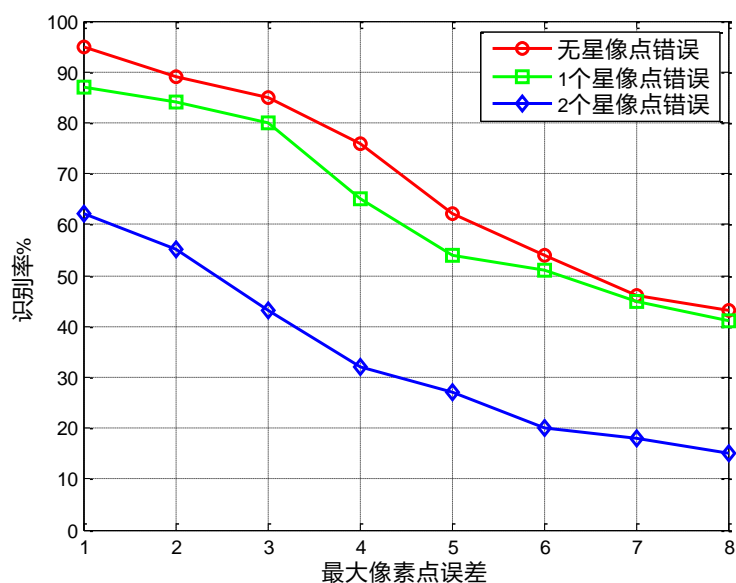


图 4.1.1.3 星图识别率仿真结果示意图

4.1.2 计算的实时性

在星像点识别错误数不大于 1 个，最大像素误差不大于 3 个的条件下，统计了星图在其所属的子库中未能匹配成功而需要进行全星图特征库匹配的概率，约为 27%。所以在统计平均上，经过星图分类后，星图识别所需的时间相对于未分类之前大约节省了 70% 的时间。在普通计算机实验平台，平均识别一幅星图所需时间大约为 1s 左右。

4.1.3 存储空间

经统计，星图特征库中的特征矩阵的平均数值个数约为 44 个，每个数值取值范围介于 $(-512, 512)$ ，则每个数值可由两个字节表示。那么存储整个星图特征库需要的存储空间不到 500KB。

5 总结与展望

5.1 论文总结

本文是对天文系统中星图识别的研究，首先是对星图识别的一些理论分析，然后提出一种改进的星图识别算法，由于传统星图识别在存储、识别率以及实时性方面有一定的缺陷为了达到三者平衡，对此研究在原有的基础上做了一部分的改进，并取得了一定的成果，主要工作总结如下：

(1) 研究了一些相关文献和一些背景及意义，主要的对星图识别方面的未来展望和现状的分析，所以为后面的相关知识有了一定的认识。

(2) 对星图识别的一些理论基础主要做了一些介绍，主要是对恒星、星表以及坐标系和坐标转换进行一些深度的认识，为下文的研究打下基础。

(3) 为克服传统星图识别方法的缺陷，重点对星图信息进行了更加精细的特征提取。通过折衷选取适当数目的星像点进行星图识别，并用粗分类和精细匹配相结合的方式实现算法在识别率、实时性和存储空间大小三者之间的平衡。

(5) 最后是对算法性能的分析，结果表明，所提算法能够准确识别题中所给的星像点，并具有容忍一定噪声误差能力。

本文克服了传统算法的一些缺陷，主要是在星图匹配之前进行了一次粗分类，能够有效的降低星图匹配的计算量。通过对星图中星点位置信息进行准确的特征提取，从而构造了一个星图特征库。借助高效的星图分类方法，实现星图的快速匹配。结果表明，能够准确的识别星像点，满足实际应用中的实时性、准确性的要求，并且具有容忍一定噪声误差能力。

5.2 论文展望

由于对天文系统的了解不够全面，在文章中还有许多不足之处，自己能力有限，所以还需要更深入的研究来对星图识别这方面提出更好的算法。未来对星图识别的研究会有很大方面发展，又因为只能进行仿真分析，不能够实用化，所以在天文系统中的星图识别研究中还需要进一步的研究，未来还有很长的路要走。

参考文献

- [1] 贾辉. 高精度星敏感器星点提取与星图识别研究[D]. 国防科学技术大学, 2010.
- [2] 张坤. 国外星用 CCD 图像传感器的研制现状[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(3):324-328.
- [3] 陈元枝, 郝志航. 适用于星敏感器的星图识别方法[J]. 光电工程, 2000, 27(5):5-10.
- [4] 董雅潇. 基于小视场星敏感器的星点提取与星图识别算法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2018.
- [5] 张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [6] 梁斌, 朱海龙, 张涛, 仝玉婵. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016
- [7] 李江操. 基于星敏感器的星图识别算法的研究[D], 中国科学院大学, 2018
- [8] 杨建, 张广军, 江洁. P 向量实现快速星图识别的方法[J]. 航空学报, 2007.
- [9] Kennedy J , Eberhart R . Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN' 95 - International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995.
- [10] Bergh B V D , Frans. An Analysis of particle swarm optimizers[J]. Phd Thesis, 2007.

致谢

转眼间大学四年已过，课题中让人欢喜让人忧，但是内心也有抑制不住的激动和感激。我历时将近两个月时间终于把这篇论文写完了，在这段充满奋斗的历程中，带给我的学生生涯无限的激情和收获。在论文的写作过程中遇到了无数的困难和障碍，都在同学和老师的帮助下度过了。首先要感谢宋毅老师指导和关心。宋老师认真严谨的科研态度教会我科研的道路充满崎岖，做事需要永不言弃。从初期的查阅文献到课题开题，完成中期考核以及论文的撰写，宋老师用丰富的学术知识为我指点迷津，其中都凝聚着老师的心血和汗水，在此向老师表示深深的感谢和敬意，感谢老师关心和细心的指导。

同时，我也要感谢本论文所引用的各位学者的专著，如果没有这些学者的研究成果的启发和帮助，我将无法完成本篇论文的最终写作。至此，我也要感谢我的朋友和同学，他们在我写论文的过程中给予我了很多有用的素材，也在论文的排版和撰写过程中提供热情的帮助！金无足赤，人无完人。由于我的学术水平有限，所写论文难免有不足之处，恳请各位老师和同学批评和指正！