

中文图书分类号: TP311.1
密 级: 公开
UDC: 621
学 校 代 码: 10005



硕 士 学 位 论 文

MASTERAL DISSERTATION

论 文 题 目 : 基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及通用可视化研究

论 文 作 者 : 宋文明

学 科 : 机械工程

指 导 教 师 : 苏丽颖 副教授

论文提交日期 : 2017 年 4 月

UDC: 621
中文图书分类号: TP311.1

学校代码: 10005
学 号: S201401098
密 级: 公开

北京工业大学工学硕士学位论文

题 目: 基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及通用可视化研究

英文题目: RESEARCH ON FITS IMAGE CELESTIAL
POSITIONING BASED ON WCS AND GENERAL
VISUALIZATION

论 文 作 者: 宋文明

学 科 专 业: 机械工程

研 究 方 向: 机构及机器人系统分析与控制

申 请 学 位: 工学硕士

指 导 教 师: 苏丽颖 副教授

所 在 单 位: 机械工程与应用电子技术学院

答 辩 日 期: 2017 年 5 月

授 予 学 位 单 位: 北京工业大学

独创性声明

本人声明所提交的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。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，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的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。

签名：_____宋文明_____

日期：2017年5月25日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：_____宋文明_____

日期：2017年5月25日

导师签名：_____苏丽颖_____

日期：2017年5月25日

摘 要

天文照相图片中目标星体的定位识别及可视化相关技术在天文观测及天体测量领域中具有重要的研究价值。本文主要对高精度 CCD 观测相机获取的 FITS (Flexible Image Transport System) 图像进行分析, 设计和实现相关处理算法, 开发了一套完整的星体目标定位识别及可视化系统, 为天文图像中定位信息的解算及可视化研究提供支撑。

本文在探讨 FITS 格式图像在天球定位原理的基础上, 对图像中恒星定位识别及可视化系统的功能需求进行了分析。设计了由星体定位识别、WCS (World Coordinate System) 坐标系转换计算、FITS 图像可视化三部分构成的系统实现方案。

首先, 针对星体目标定位精度以及定位效率的问题。通过对拍摄天文图像噪声因素的分析, 实现了平场、暗场校正和图像滤波算法, 完成了图像的预处理; 通过对预处理后的图像直方图进行分析, 设计了基于噪声特征估计的背景自适应阈值分割计算方法, 并结合 4 连通域算法实现了观测图像中星体目标的提取; 通过分析目前常用的二维亚像素定位算法在定位精度及定位效率上的优缺点, 结合 FITS 图像数据量大的特点, 采用二维高斯拟合结合二维修正矩算法实现了星体目标的亚像素定位; 在对现有三角形匹配算法进行分析的基础上, 根据系统的实际特点, 采用高效率、高鲁棒性的三角形边边边匹配算法, 提高了观测图像中恒星的识别速度。

然后, 对求取 FITS 图像文件头中以键/值对形式记录的坐标参数的算法进行分析。运用 WCS 算法, 根据球面到平面不同投影方式来建立图像坐标系与天球赤道坐标系之间的转换函数, 解算函数的转换参数从而确定图像像素及其对应的天球坐标, 完成定位。

最后, 在对 FITS 图像标准文件格式及其局限性分析的基础上, 将 FITS 与 PNG 或 JPEG 图像进行格式转换。以 AVM (Astronomy Visualization Metadata) 标准将 FITS 文件头中计算得到的 WCS 参数转换为元数据并添加到 PNG 或 JPEG 的文件头中, 来满足天文爱好者在非天文软件平台下查看及分析天文图像的一般需求。

整体设计流程通过 JAVA 编程集成实现, 经对实际拍摄天文图像的处理测试以及 SExtractor、WWT、图片查看器等软件的相关测试, 结果达到设计要求。研究结果实现了天文照相图片中恒星的精确定位及识别, 满足了公众的一般可视化

需求，为 FITS 图像天球定位及可视化系统的实现，打下了可靠的基础。研究成果对天文图像的处理、定位识别及可视化具有一定的实用、借鉴价值。

关键词：天文图像定位识别；WCS；FITS 格式转换；AVM；系统设计

Abstract

The positioning recognition and visualization of target stars in astronomical images have important research value in astronomical observation and astrometry. This paper mainly focuses the analysis of star image, which is taken by high-precision CCD camera. Relevant algorithms have been designed and implemented, the stellar location and identification and visualization in observation star image have been developed, which support the solution of celestial location information.

Based on exploring the principle of celestial location method, the requirements of star identification and visualization are analyzed, and an overall scheme including the preprocessing of star image, the positioning of stellar target and star identification, and the visualization, is designed.

First of all, the preprocessing of star image is achieved via the analysis of image noise and the implement of gray correction and image enhancement. Though the analysis of image histogram, an algorithm of background segmentation based on the estimation of noise characteristics is designed, and combining with connected domain stellar target extraction is realized. By comparing the accuracy of different sub-pixel localization algorithms and combining with the characteristics of FITS image data, the sub-pixel localization of star target is realized by two-dimensional Gaussian fitting and two-dimensional Modified Moment method. Based on the analysis of the existing triangle matching algorithm, according to the actual characteristics of the system, the efficient and highly robust triangular edge matching algorithm is adopted to improve the recognition speed of stars in the observation star.

Then, this paper select the WCS (World Coordinate System) theory by analyzing the algorithm of coordinate parameters recorded in the form of key/value pairs in FITS image files, establish conversion function of the image coordinate system and celestial equatorial coordinate system according to different projection methods of spherical to plane. This method can calculate WCS parameters of this conversion function to determine the image pixel and its corresponding celestial coordinates and to complete the positioning.

Finally, FITS images are used to carry out scientific data transmission and analysis as a kind of mainstream data format, but its high flexibility also decides the limitation of popular science education in astronomy. Researching a general image visualization method is significant. FITS is converted to PNG or JPEG images firstly. The coordinate parameters in the FITS header are converted to metadata in the form of AVM (Astronomy Visualization Metadata), and then the metadata is added to the PNG or JPEG header. This method can meet amateur astronomers' general needs of

viewing and analyzing astronomical images under non-astronomical software platform.

The overall design flow is realized through java program and tested by Aladin, WWT, picture viewer and other software. The star subdivided positioning and stellar automatic identification is realized in this paper, which have made a foundation for the celestial location system. The result is practical and referential meaning for astronomical image processing.

Keywords: Star pattern recognition, WCS, FITS format conversion , AVM, System design

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	4
1.3 本文主要工作及内容安排.....	6
1.4 本课题来源.....	8
第 2 章 天文图像定位识别算法研究.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 图像预处理.....	9
2.2.1 暗场校正.....	9
2.2.2 平场校正.....	10
2.2.3 图像滤波处理.....	11
2.3 星体目标定位.....	13
2.3.1 图像分割.....	13
2.3.2 星体亚像素定位.....	16
2.3.3 相对星等计算.....	20
2.4 FITS 图像识别与参考星表选定.....	22
2.4.1 参考星表的建立.....	22
2.4.2 三角形匹配算法分析实现.....	24
2.5 本章小结.....	26
第 3 章 基于 WCS 的天球定位分析及实现.....	27
3.1 引言.....	27
3.2 天球空间直角坐标系转换.....	28
3.2.1 赤道直角坐标系.....	28
3.2.2 空间直角坐标系的转换.....	29
3.3 WCS 坐标转换的算法分析.....	30
3.3.1 像素平面坐标系与世界坐标系的转换分析.....	30
3.3.2 世界坐标系与天球坐标系的转换分析.....	31

3.4 本章小结.....	38
第 4 章 FITS 图像格式转换及 AVM 可视化研究.....	41
4.1 引言.....	41
4.2 FITS 图像格式标准.....	41
4.3 FITS 格式转换分析.....	43
4.4 基于 AVM 标准的 PNG (JPEG) 图像的 WCS 信息添加.....	44
4.5 不同可视化实现方法的对比分析.....	45
4.6 本章小结.....	47
第 5 章 FITS 图像定位识别及可视化系统的研制.....	49
5.1 系统设计需求.....	49
5.2 系统结构设计.....	50
5.3 系统操作流程及测试.....	52
5.3.1 FITS 文件的读取与显示.....	52
5.3.2 FITS 图像星体定位.....	53
5.3.3 图像匹配识别.....	54
5.3.4 WCS 求解坐标参数.....	55
5.3.5 图像格式转换.....	56
5.3.6 基于 AVM 的元数据转换及嵌入.....	57
5.3.7 辅助操作工具.....	58
5.4 本章小结.....	59
结 论.....	61
参考文献.....	63
攻读硕士学位期间所发表的学术论文.....	67
致 谢.....	69

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

自从 1970 年美国贝尔实验室研制成功第一只电荷耦合器件以来, CCD 技术在天文观测领域便得以迅速发展。对于天文观测相机拍摄得到的天文图像, 对研究有价值的是空间观测目标的天文位置, 也就是空间观测目标在天球坐标系下的坐标: 赤经 (α) 和赤纬 (δ), 只有得到了这些数据才能进一步完成对空间目标进行定位测轨、编目等工作。而要得到空间目标的天球坐标需要完成天文图像的识别匹配、WCS 坐标转换、从 CCD 平面坐标计算出目标的天球坐标, 完成天文定位^[1]。然而, 受 CCD 图像传感器自身技术条件及观测环境的限制, 使拍摄的图像存在各种噪声, 直接对空间目标位置的定位很难达到精确天文定位解算中对恒星位置的高精度要求^[2], 因此, 对天文图像处理及恒星定位、识别匹配的相关技术进行研究具有重要意义。

天文图像的识别匹配是将观测图像中的恒星与参考星表中的参考星根据图中的特征信息进行对应匹配, 以完成视场中恒星的识别^[3]。一直以来, 鲁棒性和时效性是评定图像识别算法优劣的标准, 人们对图像识别算法的研究大都基于这两点进行的。三角形匹配算法是目前应用最广泛的方法, 其核心思想是在观测图像中以星体目标为对象构造一个观测三角形模型并唯一地与区域星表中的同构三角形进行匹配^[4]。该方法实现容易、平稳性能好而且效率较高, 但是缺点在于匹配过程中只用到了有限次的星对角距比对, 构造匹配特征的维数较低, 存在较多的冗余匹配。因此对三角形匹配算法的改进进行研究, 对提高图像匹配效率非常有意义。

图像识别匹配的完成能获取匹配到的目标星体的像素坐标与天球坐标的对应数据, 而要进一步完成图像的天球定位, 还需要建立两个坐标系之间的转换关系, 以便进行进一步地坐标参数求解。在这一需求下, WCS 应运而生。WCS^[5-8]是由 E.W.Greisen 和 M.R.Calabretta 于 2002 年提出的一种图像像素平面坐标与天球坐标之间相互转换的算法, 根据球面到平面的不同投影方式构建不同的坐标转换函数。WCS 是计算 FITS 图像文件头中与坐标信息相关关键字的核心方法, 在天球定位相关领域应用广泛。

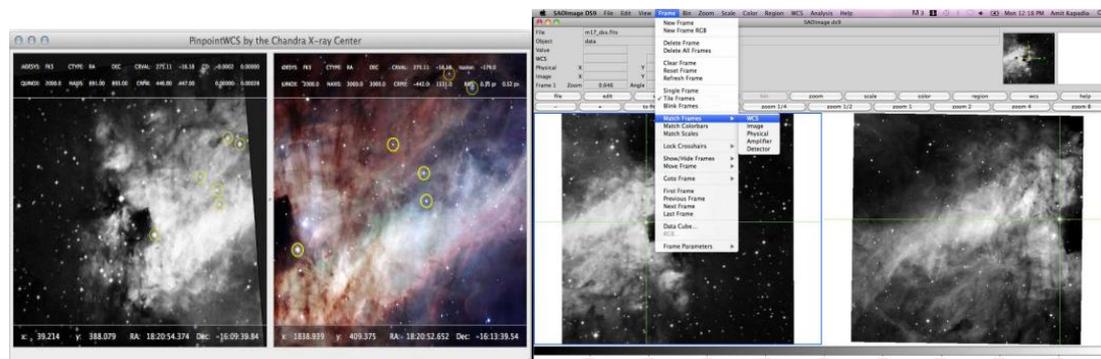
天文学家通过望远镜获取的天文照相图片不仅对天文研究工作具有重要价值, 对于科普教育也具有非凡意义。FITS 文件格式作为天文学领域应用最为广泛的数据格式, 主要用来进行科学数据的传输、分析及存档^[9]。1982 年 FITS 格

式被国际天文联合会 IAU 公布为国际标准后, 大部分的天文数据都是以 FITS 文件的格式在世界各国的数据中心和天文学家手中进行保存与交换^[10]。然而 FITS 过于灵活, 并没有通用的图像处理软件可以很好地支持 FITS 格式。而 PNG 与 JPEG 作为大众熟知的图像格式, 在 Windows 下可以得到大多数图像软件的支持, 也可以方便地与其它图像格式相互转换^[11]。因此, 实现 FITS 与 PNG 或 JPEG 格式的转换以便于 FITS 图像在公众中的传播是很有必要的。同时 FITS 文件头中通过关键字记录的图像附加信息如分辨率、观测时间及地点、望远镜焦距及光轴坐标、曝光时间、坐标信息等等重要参数, 如何将其添加到转换格式后的图像文件中, 让有条件的公众对图像进行准确展示或分析也很有意义。AVM 作为 VAMP (Virtual Astronomy Multimedia Project) 的一项核心技术, 由 IVOA (国际虚拟天文台联盟) 根据现有的元数据标准进行研发, 意在规范各大天文台及网上的天文图像规范, 利用其图像格式本身的标准将图像关键字以元数据的方式添加到文件中^{[12][13]}。这样通用软件可以按标准对图像进行正常显示, 而对于可以识别 AVM 的软件, 则可以利用这些关键信息进行更多的操作。

通过对国际上比较通用的一些支持 WCS 和 AVM 标准的软件进行分析, 针对天文图像的识别匹配、WCS 坐标转换实现天文图像星体目标的像素坐标到天球坐标的计算、基于 AVM 标准的 WCS 坐标参数的元数据转换以及 FITS 与 PNG (或 JPEG) 的格式转换从而嵌入元数据的整套流程, 发现没有一款软件能够自主实现这一过程, 而是通过不同软件的互操作来完成。首先, 通过 `wcstools`、`Astrometry.net` 或 `PinpointWCS` 来实现 FITS 图像的天球定位并求解 WCS 参数, 然后利用 `Aladin` 或 `DS9` 将 FITS 图像转换为 PNG 或 JPEG, 最后通过 `AVM Toolkit` 或 `Adobe XMP Panels` 将 WCS 参数转换为元数据并将其嵌入到 PNG 或 JPEG 的文件头中, 图 1-1 是相关软件界面, 软件互操作的整体流程如图 1-2 所示。这一操作过程不仅复杂, 而且存在很多限制: (1) `wcstools` 只能在 Linux 操作系统下编译运行, 而 `PinpointWCS` 则只能在 iOS 操作系统下运行, 在进行数据传输时需要频繁的切换操作系统; (2) `PinpointWCS` 在进行图像识别匹配的过程中需要手动采用目标; (3) `Astrometry.net` 在进行图像目标星体亚像素定位的过程只设计了修正矩法, 而不是精度更高的二维高斯拟合法; (4) 对于不同视场下天文观测相机拍摄的图像, 也需要根据视场大小选择相应软件对图片进行处理; (5) `AVM Toolkit` 与 `Adobe XMP Panels` 只能处理 PNG 格式的图像, 而且需要根据 FITS 图像中 WCS 参数手动计算并转换为 WCS 元数据标签, 并输入到对应文本框。

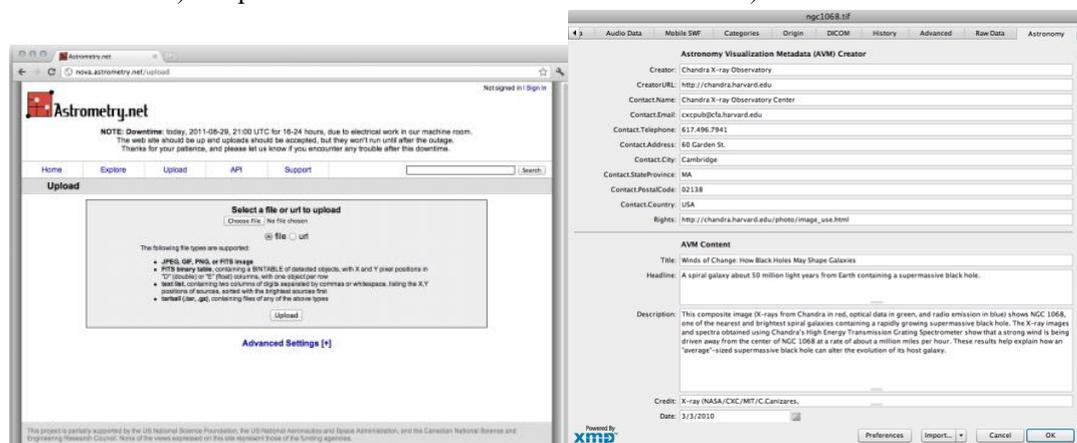
软件互操作的最终目的是为了获得带有 WCS 元数据的 PNG 或 JPEG 的天文图像。该类图像提高了天体测量的研究价值以及天文图像的通用性, 同时在特定软件平台下增强了视觉效果, 如图 1-3 所示 WWT 展示该类图像的效果图。为了

满足天体测量定位及可视化操作实现自动化的需求，设计开发一套基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及可视化系统具有重要意义。本文的系统开发通过对天文图像的天球定位识别相关算法及 AVM 标准的研究及改进并结合上述天文图像处理及可视化软件的分析来完成。



a) Pinpoint 界面
a) Pinpoint surface

b) ds9 界面
b) ds9 surface



c) Astrometry.net 界面
c) Astrometry.net surface

d) Adobe XMP Panels
d) Dark field after correction

图 1-1 FITS 图像天球定位及可视化的软件操作流程

Fig.1-1 The flow chart of celestial positioning and visualization of FITS format image by software

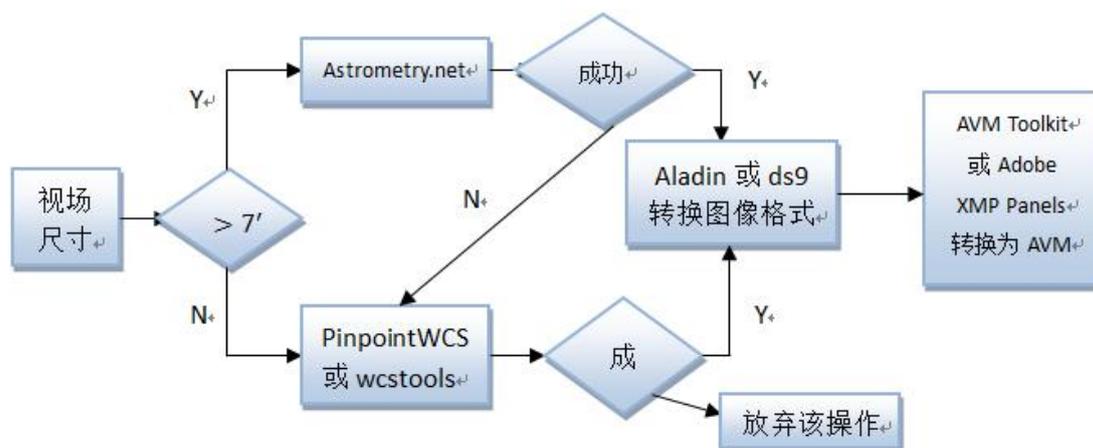


图 1-2 FITS 图像天球定位及可视化相关软件的互操作流程

Fig.1-2 The flow chart of celestial positioning and visualization of FITS format image by software



图 1-3 带有 WCS 元数据的 PNG 图像在 WWT 中的效果图
Fig.1-3 Effects of PNG images with WCS metadata in WWT

1.2 国内外研究现状

在星像照相技术的基础上,通过数字图像处理技术发展起来的照相天体测量学已成为天体测量的一个重要分支^[14]。采用照相技术有效的提高了观测效率,让很多普通观测者也能够观测到某些暗星和小行星。随着大面阵、高精度电荷耦合器件(CCD)的高速发展及其在天文观测及空间目标定位中的大规模应用,已产生了一系列成熟的图像处理、星体定位与识别匹配、坐标转换以及图像可视化等相关算法。同时,相关功能的软件也被开发出来。

(1) 由于拍摄天文图像时的拍摄环境和 CCD 硬件设备存在的影响,使观测者并不能得到理想的观测图像,因此需要对图像进行预处理以提高信噪比。对观测图像的噪声,按干扰源的不同,可采用从 CCD 的硬件设计到软件算法等不同的方法去除^[15]。图像处理中消除噪声的方法主要来自两个方面:一方面是空间域处理方法,它主要包括灰度变换和空间域滤波;另一方面是频域处理方法,主要包括低通滤波、高通滤波和带通滤波等。

(2) 在星体定心算法方面,现阶段已经提出了许多数字定心算法。有基于图像灰度的质心法、一维的高斯拟合法、一维修正矩法、中值法、二维高斯拟合法、二维修正矩法等^[16,17]。这些方法是在对星体中心的定义不同理解的基础上产生的,在不同时期,这些方法都曾应用于星体定心的测量。目前与天体物理研究相关的软件包中大都实现了这些方法,很少有人将这些方法在一个相对合理的统

一的标准之下进行综合比较。Stone^[18]在 Auer^[18,19,20]、Van Altena^[18-22]、Chiu^[22]、Stetson^[23]等^[24-31]人研究的基础上将各种定心算法应用于数字图像处理上,通过对各种算法在处理速度、收敛性、对暗星检测的能力特别是精度等方面进行了比较分析,得出修正矩方法在各种评判标准上较之其他方法都具有一定的优势。中科院云南天文台的季凯帆在他的博士论文^[32]中也重点研究了对仿真图像的一维、二维定心算法的比较。他得出的结论是,就定心精度而言,一维方法中高斯拟合法要比修正矩法、中值法、寻导法要好。而对二维方法进行比较后,他得出修正矩方法在精度上要比高斯拟合法要好。虽然两者差别很小,但是在计算时间上,二维高斯拟合法比修正矩方法耗时多,而二维处理方法在精度上要比一维方法高一些。所以,季凯帆得出修正矩方法对比其他方法具有相当的优势。本文通过对 Stone、季凯帆等人在亚像素定心算法研究比较的基础上,考虑到对算法较高计算效率及较高定心精度要求的前提下,研究了一种改进的亚像素定心算法。该方法均衡了二维高斯拟合算法的精度以及二维修正矩法的较高计算效率,并在本文中得到了测试及精度对比。

(3) 星体识别算法也是种类繁多,各具特色。可以概括为三个类别:第一种是基于图形同构的算法,如三角形匹配算法;第二种是基于星群的方法,如栅格法;第三种是基于神经网络的方法、遗传算法和蚁群算法等。

三角形匹配算法最早由 Groth 提出,通过构造三角形并利用三角形的 3 个角距进行识别。该方法比单个角距识别方法的冗余度要少很多。但是该方法由于匹配时使用的信息有限,依然会产生多重匹配,存在识别冗余,而且星表在对应天区中的星体数目较多,构建三角形时有很多种不同的组合,所以需要的存储空间比较大^[34]。

栅格算法是由 Knuth D E, Morris J H 和 Pratt V R 最早提出,即 KMP 算法^[33]。该方法主要由三部分组成:第一、观测图像中星体位置、亮度等特征信息编译为字符串;第二、对应天区星表中星体位置、亮度等特征信息编译为字符串;第三、将观测图像的字符串和星表的字符串进行匹配。若两个字符串匹配成功,则记录每颗星的观测信息和星表信息。该方法对星体亮度和位置的精度要求很高,而且若有些星体没有成功提取或成像失败,均会导致匹配错误或匹配失败^[34,35,36]。

神经网络运用于模式识别已经是比较成熟的技术,通过合理地确定图像中的模式可以有效地利用神经网络进行图像识别^[37]。如果训练样本比较好,则利用神经网络可以很快完成图像的模式识别工作,但是神经网络的训练需要较大的计算强度,需要有大量的训练样本且对样本的各种分布都有要求,相应地需要增加大量的存储空间,对硬件的要求非常高,并不适用于普通计算机进行处理。

前面研究的三种匹配算法中,三角形匹配方法简单易于实现是目前广泛使用

的方法。针对其依然存在匹配冗余度的缺点,很多学者对该方法进行了各种改进。如张广军的一种改进的三角形星图识别方法^[38], Bezooije 提出的主星识别方法^[39], 孟靖的改进的带公共边的四边形识别算法^[40], 原玉磊的多三角形识别方法^[34]。各种改进的方法均是通过增加匹配时的特征信息来消除匹配的冗余度。增加的特征信息主要分为两类:一种改进方法是增加了星体的星等信息,该类方法要求有较高的星等测量精度。在本文中对观测图像归算的星等为相对星等,它与视星等之间存在一定的误差,其中相对星等是为了筛选高亮度星体而设定的一个亮度属性,视星等则是参考星表中提取的恒星星等,所以本文无法使用星等作为特征信息,只能使用星体间的相对位置作为特征信息进行图像识别。另一种改进方法是增加识别维度,如多三角形识别算法、四边形识别算法等。但是这种增加识别维度的方法也增加了算法的复杂度和匹配的计算量。

通过对以上星体识别算法研究现状的分析,考虑到本文所开发的定位及可视化系统的运行效率,结合观测图像的视场较大的特点,从而采用三角形匹配算法。同时,针对该算法具有匹配冗余度的缺点,对该算法进行了相应改进,即对于匹配到星表三角形多于 1 个的观测三角形直接进行舍弃,这种舍弃对整张底片的匹配结果不会有较大的影响。

(4) 在天文图像识别匹配后的天球定位解算过程中,求解 CCD 平面坐标系到天球坐标系之间的位置传递函数的算法也相对成熟,主要有常数法及 WCS 法等。其中,常数法引入了理想坐标系将天球坐标转换为理想坐标,为了确定参考星 CCD 平面坐标和理想坐标之间的关系,需要使用合适的常数模型,常用的常数模型有一阶(六)常数模型、二阶(十二)常数模型、三阶(二十)常数模型、四阶(三十)常数模型^[41-44]。量度坐标和理想坐标均属于平面直角坐标,但是两者之间存在差异,根据不同的差异需要采用不同的常数模型进行转换。WCS 方法则是根据选择的球面到平面投影方式的不同而建立传递函数模型,常用的投影方式有方位投影、圆柱投影、圆锥投影等^[45]。

随着工程应用的进一步发展需要,星体定位及识别技术也将相应地不断改进和扩展。总的趋势就是朝着全天自主、定位精确、识别率高、算法性能好的方向发展。

1.3 本文主要工作及内容安排

如何利用 FITS 文件中的坐标参数计算图像中目标星体的天球坐标,甚至是在不知坐标参数的情况下,又是如何利用现有的算法及技术来获取参数;如何将 FITS 图像转换为 Windows 环境下通用图像格式并将 FITS 文件头中的参数嵌入到转换格式后的图像中来,满足公众对天文图像编辑、分析及检索的需求。这些

问题都是本文亟待解决的核心问题。针对以上所提问题，本文的主要工作包括以下几点：

(1) 在对天球定位中天文照相图片处理需求进行分析的基础上，针对拍摄图像的特点实现了平场、暗场校正及图像滤波算法；通过对图像直方图的分析，设计实现了基于噪声均值方差估计的星体提取；通过对不同亚像素定位算法的性能进行了分析和试验对比，结合拍摄天文图像的特点，采用二维高斯曲面拟合及二维修正矩法的结合实现了星体目标的亚像素定位；根据 CCD 观测相机的相关参数，从依巴谷星表中提取与观测图像对应天区参考星表。为提高系统运行速度，采用实现容易、实时性较高的三角形匹配算法，来获取观测图像中星体目标与参考星表中恒星的匹配对应表，即像素坐标 (x, y) 和对应的天球赤道坐标 (α, δ) ；

(2) 根据对后续 FITS 图像可视化的操作需求，利用 WCS 算法中的球心映射投影方式 (TAN) 建立两个坐标系之间的位置传递函数，通过计算，求解函数中的 WCS 参数，同时将这些参数嵌入到 FITS 文件头中；

(3) 将 WCS 参数以 AVM 标准转换为元数据并保存到 .xmp 的文件中，转换 FITS 格式到 PNG 或 JPEG，把生成的 WCS 元数据嵌入到转换格式后的 PNG(或 JPEG)中；

(4) 通过 JAVA 编程设计开发基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及可视化系统。

本文各章节安排如下：

第一章 绪论部分，阐述了课题的背景、研究目的及本文的章节安排。

第二章 首先研究了图像预处理的相关算法，针对图像的特点，引入了 FITS 图像暗场、平场校正及滤波处理，消除噪声以及像元不一致对图像造成的影响；随后利用基于灰度的阈值分割法对处理后的 FITS 图像进行前景及背景的分割，并通过 4 连通域标记法提取星体目标；以二维高斯拟合及二维修正矩法的理论为切入点，并结合二者对星体进行了亚像素定位，在保证定位精度的前提下提高了计算速度，通过与 SExtractor 源提取器的比较验证了定位的准确性；选择依巴谷星表作为参考星表，依据 CCD 观测相机的相关固定参数提取与图像位置区域相关的参考星表，并对其中的恒星的视位置坐标进行了修正，随后采用三角形的边边匹配识别法建立星体的像素坐标与天球坐标的对应表，为后续的坐标转换函数的建立提供数据支持。

第三章 对 WCS 的算法进行了研究，将 FITS 图像中目标星体的像素坐标到天球赤道坐标的转换划分了两个阶段。并利用相关的 WCS 参数建立二者之间的函数式，将三角形匹配得到的目标星的像素坐标与天球坐标对应数据代入 WCS 建立的函数中，进行最小二乘平方差求解，求得八个未知参数，并将这八个 WCS

参数添加到 FITS 图像的文件头中。

第四章 分析了 FITS 图像的格式标准,针对不同位数的像素数据进行了灰度映射,实现了 FITS 与 PNG、JPEG 之间不同格式的转换方法。通过对 AVM 标准及规范的研究,实现了 FITS 中的坐标参数到 PNG、JPEG 中的元数据转化,将元数据嵌入到 PNG(JPEG)的文件图中,在 WWT 中验证了该图像。

第五章 通过对软件系统的需求分析,设计开发了基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及可视化系统。并对该系统整体结构及功能进行了说明,最后测试了软件的可行性。

1.4 本课题来源

本课题得到基金项目“国家自然科学基金项目 (11503051, 61402325, U1531111, U1531115, U1531246)”与“科技部科技基础性工作专项 (2012FY120500)”的支持。同时得到中国天文数据中心提供的数据资源支持。中国天文数据中心得到国家科技基础条件平台建设项目“地球系统科学数据共享平台”和“基础科学数据共享网—理化天文空间生物”的资助。

第 2 章 天文图像定位识别算法研究

2.1 引言

本章通过分析 CCD 相机拍摄的观测图像中噪声产生的原因以及灰度分布特点，在确保系统运行效率及定位精度的前提下，对图像预处理相关算法、图像分割算法、星体亚像素定心算法以及图像匹配识别算法进行了针对性的研究及改进。本章作为天球定位识别及可视化系统的第一模块，处理流程如图 2-1 所示。

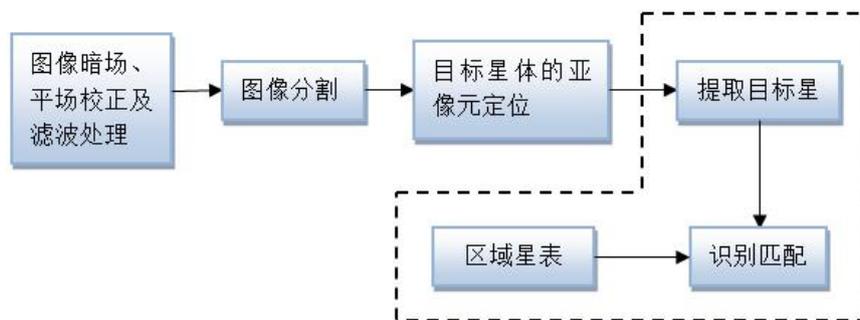


图 2-1 天文图像匹配识别的框架流程

Fig.2-1 The process of astronomical picture matching

2.2 图像预处理

理想情况下，当相机对均匀的目标成像时，得到图像中所有像素点的灰度值理论上应该是相同的。然而，实际上图像中各像素的值往往会有较大差异，这主要是受到 CCD 传感器以及观测环境的影响。对观测图像进行预处理的目的是，在不损失图像细节、不丢失图像精度的前提下，尽可能消除各种噪声和干扰，并对图像进行滤波处理，以提高信噪比，获取高质量的图像。图像预处理作为本文系统中定位识别模块的第一步，去噪的好坏直接影响之后星体定位精度的高低及识别的正确率，因此研究合适的去噪及滤波算法尤为重要。

2.2.1 暗场校正

本文通过对观测图像中的噪声进行分析，可以发现其主要包括 CCD 暗电流噪声、空间辐射噪声以及 CCD 读出噪声等，其中暗电流噪声占主导地位。在感光时间、CCD 芯片环境温度等条件相同时，CCD 像元的暗电流大小可看成是一个固定值^[46]。从每个像素单元中减去对应的暗电流值，可以有效地减少暗电流对输出图像的影响。因此，本文通过设置感光时间及 CCD 芯片的环境温度等控制 CCD 相机在无光照的条件下数字化输出图像，来获取对应感光时间及环境温

度条件下的输出图像作为暗电流图像。将获取的图像减去暗电流图像从而获取本底图像。暗场校正对降低图像的总噪声、提高图像的信噪比具有非常重要的意义。可以使用式(3-1)描述:

$$g(x,y) = \begin{cases} f(x,y) - d(x,y) & f(x,y) > d(x,y) \\ 0 & f(x,y) \leq d(x,y) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 $g(x,y)$ ——暗场校正后图像对应像素的灰度值;

$f(x,y)$ ——原图像对应像素的灰度值;

$d(x,y)$ ——暗电流对应像素的灰度值。

针对本文测试图像 `testx90maw.fits`, 截取其中坐标为(657,433)附近的一个区域子图, 如图 2-2 所示, 其中 a) 图为原图像, 可见图像中央明显有一个暗电流尖峰, b) 图为减去暗电流灰度纠正后该区域的图像, 该点并不是目标星体, 减去暗电流后得到纠正。

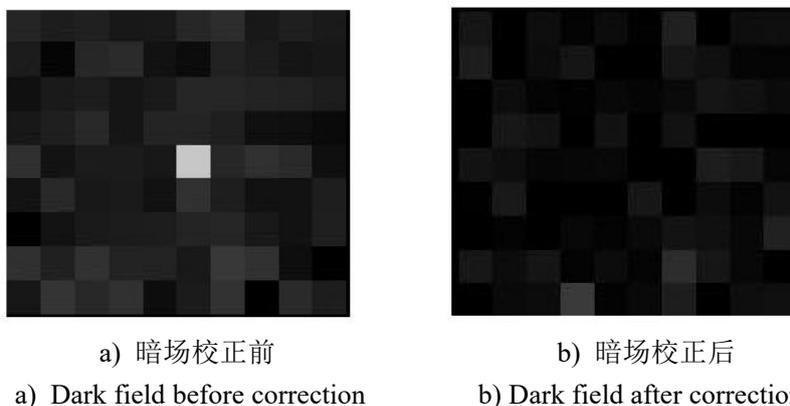


图 2-2 暗场校正示意图

Fig.2-2 Illustration of dark field correction

2.2.2 平场校正

由于光照不均匀、镜片中心和镜片边缘的响应不一致、成像器件各像元响应不一致以及固定的图像背景噪声等等原因造成的图像中像素值的较大差异, 还需要对图像进行平场校正。这是本文进行高精度天体测量时对图像应该做的预处理, 它能够较好地消除图像中各像元响应的不一致性^[47], 提高天体测量精度。首先需要获得平场图像 $P(x, y)$, 它是通过拍摄均匀光场而获得的, 该图像要求光照水平尽量接近饱和照明条件并且必须用均匀光场进行照明。

然后可以利用前文中已经得到的本底图像 $g(x, y)$ 求出本底图像中所有像素点的平均灰度值 \bar{B} , 把这个平均灰度值作为本底图像的整体估计值; 接着利用已经得到的平场图像减去这个平均灰度值求出平场图像中各个像素点对应的光照水平 $I(x, y)$, 以及所有像素点的平均光照水平, 作为平场图像的整体估计值 \bar{I} , 最后对于一幅需要做平场改正的图像 $P(x, y)$, 平场改正后的图像可以表示为:

$$P'(x, y) = \frac{P(x, y) - \bar{B}}{I(x, y)} \times \bar{I} + \bar{B} \quad (2-2)$$

把前文中经过暗场校正的相同坐标位置的区域子图进行平场校正, 结果如图 2-3 所示, 可以发现, 图像中暗电流再一次降低。

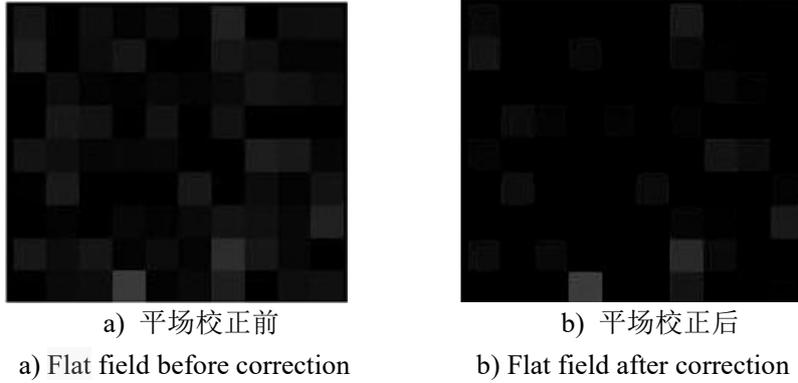


图 2-3 暗场校正示意图

Fig.2-3 Illustration of dark field correction

2.2.3 图像滤波处理

暗场及平场校正虽然可以有效降低暗电流影响, 较好的消除图像中各像元响应的不一致性, 但并不能完全去除暗电流。因此本文还需要通过图像滤波的相关算法增强图像中的有用信息。目前对天文图像进行滤波去噪应用较多的是空间域平滑滤波和频域小波滤波^[48]。前者主要采用二维高斯平滑滤波, 通过设定一个 3×3 或 5×5 模板, 利用邻域内像素的加权灰度值去替代图像每个像素点值, 这种处理减小了图像灰度的“尖锐”变化。后者主要采用二维墨西哥帽降低图像中的高频成分, 降低噪声水平而且不影响星点图像的灰度分布规律。考虑到图像中星体灰度分布类似高斯曲面, 质心的灰度值最高, 而以质心为原点随着半径越大, 灰度值逐渐降低, 因此采用二维高斯滤波能够更好的保护图像的特征信息, 且在实际图像处理中得到了工程人员的有效使用。二维高斯滤波的函数定义为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2-3)$$

只要知道模板的大小和高斯函数的方差 σ , 由二维高斯函数的表达式很容易计算出高斯核, 只要在归一化就可以了。但是由高斯函数的分布特性可知落在 $u-3\sigma$ 到 $u+3\sigma$ 的概率大于百分之九十九, 所以模板大小的采用往往与 σ 的取值是相关的, 一般而言, 取 $dim = 2 \times ((int)(3.0 \times \sigma))$ 。当然实际中其实没有这么严格, σ 的取值决定了高斯函数窗口的大小。在实际中经常看到 σ 取值 0.8 或者 1。正常情况下由高斯函数计算得到的模板是浮点型数, 即 double, 但是有些情况为了加快计算需要将模板处理成整数, 对于常见的 3×3 或者 5×5 其整数模板如图 2-4 所示:

$$\frac{1}{16} \times \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{273} \times \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

a) 3×3 高斯模板
a) Gaussian template of 3×3

b) 5×5 高斯模板
b) Gaussian template of 5×5

图 2-4 3×3 及 5×5 的高斯模板

Fig.2-4 Gaussian template of 3×3 and 5×5

当有噪声存在时，利用高斯平滑滤波器模板，通过在图像中逐点地移动模板在每一点 (x, y) 处与模板事先定义的响应系数进行加权计算。能够有效的保留图像中星体的灰度信息并进行减噪处理。如式(2-4)所示：

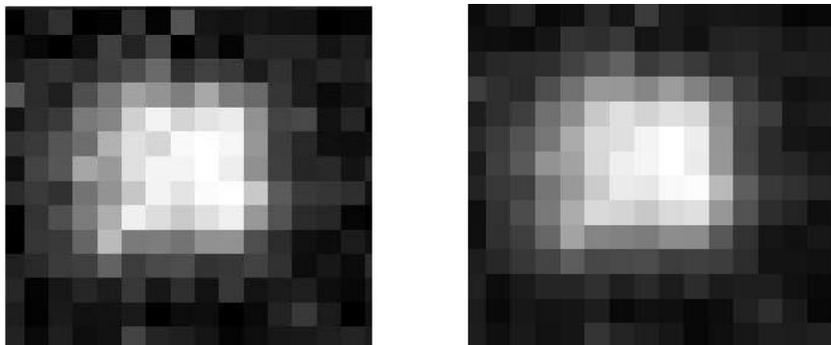
$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (2-4)$$

式中 g ——滤波后的图像；

w ——滤波器模板；

f ——原图像；

一般情况下滤波器的长宽都为奇数，由于典型的随机噪声是由尖锐变化引起的，因此常见的平滑处理就是减噪。同时锐化滤波是强调了图像被模糊了的细节，但在本文中星图星体部分与背景的“落差”已经足够大不需要再进行强调，所以本文使用 3×3、 σ 为 0.5 高斯平滑滤波器对图像进行滤波，降低热点和 CCD 阵列的坏点对图像的影响，易于星体分割和精确定位并且对定位精度影响较小。图 2-5 为测试星图 testx90maw.fits 中坐标为(817,653)的一个星体子图像，其中 a)图为滤波前该区域图像，右图为平滑滤波后图像灰度值更加均匀，滤波后情况明显改善。



a) 二维高斯滤波前
a) Two-dimensional gaussian filtering before

b) 二维高斯滤波后
b) After two-dimensional gaussian filtering

图 2-5 二维高斯滤波示意图

Fig.2-5 The illustration of two-dimensional gaussian filtering

2.3 星体目标定位

星体质心的高精度定位是星体识别及天球定位的关键技术。然而，受 CCD 图像传感器自身技术条件及星点图像灰度分布的限制，直接对星体目标位置的定位很难达到天文定位解算中对恒星位置的高精度要求。要得到更高精度的星体位置，需要从图像中星体的灰度分布得到其亚像素位置。因此需要研究适当的算法来准确地分割星体子图和计算星体质心的亚像素级位置坐标。

目前对于星体提取的软件较多，比较常用的是 `wcstools` 中的 `wcsstar` 及 `SExtractor` (`Source-Extractor`) 等。`wcstools` 是一个通过设置和利用世界坐标系统 (WCS) 在最常见的天文图像格式 FITS 和 IRAF.imh 的文件头中建立像素坐标和天球坐标关系的程序包，其中 `wcsstar` 是它的一个子程序，用来提取星体的亚像素坐标。`SExtractor` 是一个可以从天文图像中建立星体目标目录的程序，在大容量星图星体提取中应用较多。

2.3.1 图像分割

图像分割是本文对天文图像定位识别的第二个环节，分割的目的是将所需的目标星体从背景和其他较暗的星体中分离出来，实现目标星体的提取。实现图像分割之后，为了进行恒星星点的细分定位，可以使用连通域标记算法提取分割之后的星点。

基于灰度阈值的方法和基于边缘的方法是目前两种比较常用的图像分割方法。灰度阈值分割方法实际是通过图像二值化方法将目标物体的像素与背景像素进行分离。使用这种方法实现图像分割的步骤如下：首先确定合适的阈值，然后将每个像素和阈值进行比较，满足阈值范围的即为目标物体像素，相反，则为背景像素。由于这种算法简单，而且运行速度较快效率较高，所以在图像分割领域应用较为广泛^[49]。图像分割的另外一种重要方法是通过边缘检测，即检测灰度级或者结构具有突变的地方。这表明一个区域的终结，也是另一个区域开始的地方，这种不连续性即边缘^[50]。由于不同的图像有不同的灰度值且在边界处有明显的边缘，这个特征可以用来实现图像的分割。一阶导数为极值点且二阶导数的过零点（零交叉点）的位置即为阶跃状边缘，所以可以使用微分算子实现边缘的检测，例如 `Laplacian`、`log (Laplacian-Gauss)`、`Sobel` 等等微分算子^[51]。由于噪声对这些微分算子的影响较明显，所以这种方法对噪声较小的图像较为适用。

本文所使用的实验数据来自于 `SCUSS` (南银冠 U 波段巡天) 图像。通过分析图像的灰度直方图，可以发现图片中呈现大面积低灰度背景区域的直方图曲线比较光滑，近似服从高斯分布；而高灰度区域直方图分布零散并且主要由目标星

体构成，数量较少，如图 2-5 所示。

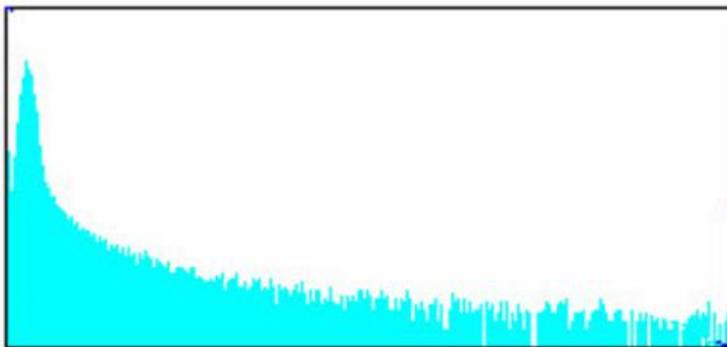


图 2-6 灰度直方图分布

Fig.2-6 Gray-level histogram distribution

因此，本文采用基于灰度的自适应阈值分割法来提取星体像素。其中，阈值的选取很重要，当阈值过低时会将噪点和背景误当星象提取出来，当阈值过高时会将暗星当做背景丢失^[52]。自适应阈值法即根据观测图像质量的不同确定不同的阈值，背景阈值可以用下式表达：

$$T = E \pm n \times \sigma \quad (2-5)$$

式中 T ——星体分割阈值；

n ——为虚警概率相关的系数， n 值越高虚警概率越小，但是丢失星体目标的概率会增加，通常数值 n 的取值范围为 3–5，根据标准正态分布表可以得到 n 取 5 时虚警概率为 10^{-7} 量级；

E ——整块图像像素灰度值的均值，由每个像素灰度值 $I(i, j)$ 的和求平均值来确定 E 的值；

σ ——整块图像像素灰度值的方差。

E 、 σ 具体的计算如下：

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i, j)}{m \times n}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I(i, j) - E)^2}{m \times n}} \quad (2-6)$$

得到分割阈值 T ，任何满足 $f(x, y) \geq T$ 的点 (x, y) 为目标点，其它点则为背景点，阈值处理后的二值图像为：

$$I(i, j) = \begin{cases} 1 & f(i, j) \geq T \\ 0 & f(i, j) < T \end{cases} \quad (2-7)$$

图像二值化后完成了星体像素和背景像素的分割，不同星体的识别则采用连通域标记方法来实现。不同的连通区域标记不同的序号，每个连通区域就是一个星体目标。这里需要舍去所占像素数目过多或过少的星体。像素数目过少的星体可能是噪点，像素数目过多的星体可能是曝光过度产生的（如天然卫星观测时主星的星象）或者是星云双星等，所以两者都应该被剔除。观测图像中除了第一行、

最后一行、第一列及最后一列的像素外，每个像素周围都有8个相邻的像素，常用的连通域关系有4邻域连通和8邻域连通。图2-6a)图所示为4邻域连通，判断时若某像素点与其左(上、右、下)方像素同时为1，则认为该像素与其左(上、右、下)方像素连通。图2-6b)图所示为8邻域连通，判断时除了4连通域包含的4个方向，还需要判断左下、左上、右上、右下4个方向是否连通^[53,54]。考虑程序执行速度，本文采用4连通域标记法。

通过4连通域标记法，对具有相同特征的目标按照一定的规则使用相同的标号进行标记，将标记记录到等值表，然后对所有标记进行检索，合并相同标记的连通域，通过分析连通域所占像素的数量就可以到达区分有效目标和噪点、干扰点和坏点的目的。

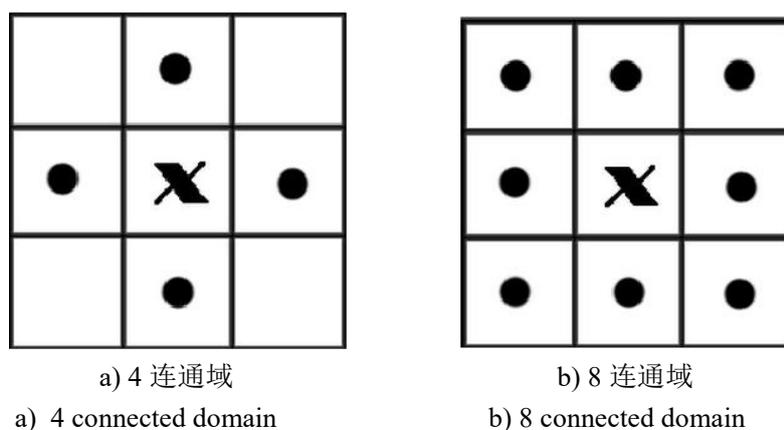


图2-7 像素的连通域示意图

Fig.2-7 Pixels of connected domain

本文具体4连通域步骤设计如下：

- (1) 由左边到右边、从上方到下方的顺序逐个扫描图像；
- (2) $I(i, j)$ 的灰度值不等于0，则分以下几种情况：
 - 1) 若上方像元或者左方的像元有一个标记，就记录此标记；
 - 2) 若上方像元或者左方的像元出现相同的标记，同样记录此标记；
 - 3) 若上方像元或者左方的像元出现的标记不同，记录上方像元的标记，然后把这两个标记记录到等值表当成等价的标记；
 - 4) 否则就将此像元点输入一个与之不同的标记并记录在相等价的附表中；
- (3) 重复第2)步，当检索过图像中任意一个灰度值不为0的像元后停止工作；
- (4) 合并星点目标，把图像中所有标记相同的像元合并成一个目标，然后给目标分配一个新的标记。

4邻域法是一个以像元为中心标记相邻的四个像元，若当前像素为图像中第一行、最后一行、第一列及最后一列的像元之一时，该像元不完全拥有4个方向的相邻像元，此时只需要判断其中某些存在的相邻像素即可。每个目标在图像中

都表示成为在邻域内具有相同标记的像元的集合。经过这样的处理之后所有目标都会有不同的标记，如图 2-8 所示。

在进行图像识别时，通常会选择亮度较大的目标作为观测星，因此识别匹配时并不需要保留所有目标。在确定有效目标的时候，只要保留满足某个亮度值以上的目标即可。基于这点一般将像素点数在 36-100 个之间的前景确定为有效目标。图 2-9 边框内为经过连通区域分析的一个星体子图，可见其大小为 7×8 像点，满足亚像素定位对面积的要求。

		1								
	1	1	1							
	1	1								
						2	2	2		
					2	2				
							3	3	3	
							3	3	3	
							3	3		
							4	4	4	4

图 2-8 分割的 4 连通区域

Fig.2-8 Split 4 connected area

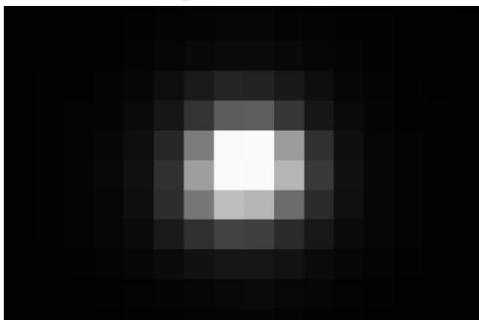


图 2-9 星体子图

Fig.2-9 Astral subgraph

2.3.2 星体亚像素定位

星体子图分割之后，获得了主要由高亮度星体目标构成的子图区域。CCD 摄像器件的最小分辨率为一个像素，其测量精度受到像素分辨率的制约，为了突破制约可以通过对其分析得到星体中心精确合理的亚像素坐标。星体亚像素定心精度直接影响着星体的定位精度。定心算法有一维定心算法和二维定心算法。一维定心算法是先对二维图像做边缘分布简化，再分别计算星象 x 和 y 方向的中心位置。一维定心算法比二维定心算法简单更易于实现，但是一维定心算法不可避免的丢失了一些有效信息，一般情况下二维定心算法的精度要好于一维定心算法

的精度。常用的二维定心算法主要有二维高斯拟合法和二维修正矩方法。前文已经提到，二维高斯拟合定心精度高，但运行速度较慢；而二维修正矩法定心虽然不如前者，但运行快。所以本文对两种算法进行研究并结合二者优点进行了设计。

2.3.2.1 二维高斯拟合法

星体在图像中的灰度分布是中心值最高，然后向周围依次递减，假如在没有环境因素、硬件因素影响的理想情况下，其呈现的就是标准二维高斯曲面。因此高斯拟合法被作为星体定心测量的标准算法，在大部分为天体测量而编写的软件包中都集成了高斯拟合定心的功能。其最广义的表达式为：

$$I(x, y) = B + \frac{\sum I}{2\pi R_x R_y \sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \times \left[\frac{(x-x_c)^2}{R_x^2} - \frac{2\rho(x-x_c)(y-y_c)}{R_x R_y} + \frac{(y-y_c)^2}{R_y^2}\right]\right\} \quad (2-8)$$

考虑到在成像过程中，可以认为 x 、 y 是独立的两个随机变量，从而 $\rho = 0$ ，而拍摄星体在图像的分布可以认为是旋转对称的，简化上述表达式为：

$$I(x, y) = B + H \times \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2R^2}\right\} \quad (2-9)$$

式中 H ——高斯函数的峰值，为 $\frac{\sum I}{2\pi R}$ ，在高斯曲面图中用最大值与最小值背景

之差来表示；

B ——天光背景值；

R ——高斯半径，与大气条件的好坏有关；

(x_c, y_c) ——星体中心的亚像素坐标。

通常使用大气视宁度 *Seeing* 来表征大气条件的好坏，大气条件越好，*Seeing* 值越小。*Seeing* 表示的是 $I(x, y)$ 的半峰全宽 (*FWHM*)，即 *FWHM* 是 $I(x, y)$ 峰值高度一半时对应的星象宽度，有：

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}R = 2.355R \quad (2-10)$$

(2-9) 式中有五个未知数 (x_c, y_c, H, B, R)，其中 (x_c, y_c) 即为星体的中心。该式为二元二次非线性方程，使用泰勒公式将其展开并忽略高次项使方程组线性化，采用非线性方程组的牛顿迭代法，将非线性最小二乘问题逐次化为一组线性最小二乘问题来迭代求解。对式进行一阶泰勒展开化：

$$I'(x, y) = I(x, y)|_0 + \frac{\partial I'}{\partial B}|_0 \Delta B + \frac{\partial I'}{\partial H}|_0 \Delta H + \frac{\partial I'}{\partial x_c}|_0 \Delta x_c + \frac{\partial I'}{\partial y_c}|_0 \Delta y_c + \frac{\partial I'}{\partial R}|_0 \Delta R \quad (2-11)$$

其中, $\frac{\partial I'}{\partial B} = 1$;

$$\frac{\partial I'}{\partial H} = \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2R^2}\right\};$$

$$\frac{\partial I'}{\partial x_c} = H \times \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2R^2}\right\} \times \frac{x-x_c}{R^2};$$

$$\frac{\partial I'}{\partial y_c} = H \times \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2R^2}\right\} \times \frac{y-y_c}{R^2};$$

$$\frac{\partial I'}{\partial R} = H \times \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2R^2}\right\} \times \frac{[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2]}{R^3};$$

令 $f(x,y) = [I(x,y) - I'(x,y)]^2$, 迭代拟合求解出满足 $\min \sum f(x,y)$ 的五个参数的解。当 $|\Delta x_0| < 0.001$, $|\Delta y_0| < 0.001$, $|\Delta r_0| < 0.001$, $|\Delta h_0| < 0.01$, $|\Delta b_0| < 0.01$ 时结束迭代。由于该方法是使用最小二乘迭代的方法求解未知数, 所以要求星象所占的像素数目至少为 5 个^[55]。

天光背景是陆地夜空散射、接收器内部的散射光线等多种因素的结合体, 要确定星体的天光背景值 B , 通常的做法都是在以星体为中心的一个环形区域内找到一个计数值来表示该星体的 B 值^[31]。显然, 要使求得的 B 值与真实值的误差尽量减少, 应使内环尽量远离星体中心, 因为星体的计数值明显高于背景计数值, 如果将星体本身加入到求取背景的环中, 那得到的背景值就会比真实的背景值要高。对于不同亮度的星体, 在同一幅图像中, 星体的大小随着星体亮度值而改变。在实际操作中, 可以通过一次高斯拟合得到一个较为精确的中心位置, 然后利用拟合得到的可以在一定程度上表示星体亮度的 H 来估计星体的半径, 再根据这个半径来确定环形区域的内环半径估计值 N (以半峰全宽 $FWMH$ 为单位), H 越大 N 越大, N 随 H 的变化幅度经过多次实验得到。

N 和 H 的关系用公式表示为:

$$N = \begin{cases} 1.5 & 0 \leq H < 100 \\ 2.5 & 100 \leq H < 300 \\ 3 & 300 \leq H < 700 \\ 3.5 & 700 \leq H < 1000 \\ 4 & 1000 \leq H < 1600 \\ 5 & H \geq 1600 \end{cases} \quad (2-12)$$

这样就可以得到一个远离星体中心 (此时的中心为五参数拟合得到的中心) 的环形区域, 环形区域的内环半径为公式 (2-12) 得到的 N 值与高斯拟合函数的半峰全宽 $FWMH$ 乘积, 外环半径依据不同的图像有不同的取值, 一般而言, 环形区域越大, 其包含的像元点越多, 求得的背景值会越接近真实背景值, 但实际

拍摄的图像中包含的星体都会比较多,当星体分布较密集时,就不能将环形区域取得太大,否则会因为将其他星像采用到环形区域中而使得求取的背景值偏大,在本文所处理的 CCD 图像中,因为星体整体分布都较为稀疏,所以将外环半径取值为内环半径的两倍。如图 2-10,对于黑色圆所代表的星像,蓝色区域为求取天光背景的区域。



图 2-10 星体求取背景区域

Fig.2-10 Astral calculating background region

2.3.2.2 二维修正矩法

二维修正矩法是利用星体灰度值的分布特征,对星体像素进行灰度值加权运算。距离星体中心越近的位置灰度值越大,计算该星体中心时其所占的权重也越大。传统矩方法的计算为:

$$x_c = \frac{\sum_y \sum_x x [I(x, y) - B]}{\sum_y \sum_x I(x, y)}, \quad y_c = \frac{\sum_y \sum_x y [I(x, y) - B]}{\sum_y \sum_x I(x, y)} \quad (2-13)$$

式中 (x_c, y_c) ——星体中心;

$I(x, y)$ —— (x, y) 像元上的灰度值;

B ——背景灰度值。

这种方法的定位精度对背景值的取值很敏感,因为该方法的计算中每个像素点均是以其距离星体中心的大小作为权进行的。所以 Stone 等人对传统的矩方法做了一定的改进,改进后的方法设定了门限 $T=B+3\sigma$, σ 为背景标准偏差。灰度值高于 T 的像素将参与星体中心的计算,灰度值低于 T 的像素将被舍掉,修正后得到新的像元点的计数值为:

$$I'(x, y) = \begin{cases} I(x, y) - T & I(x, y) > T \\ 0 & I(x, y) < T \end{cases} \quad (2-14)$$

将式(3-14)求得的 $I'(x, y)$ 代替式(2-13)中的 $I(x, y)$,就可得到星体的中心坐标估计。对于二维修正矩方法的背景值的测定,选用星体周围不含任何星体的一小块背景区域,将该区域中像元灰度的平均值作为所测星体的背景值,在求取

背景值 B 的过程, 同时也可以得到这个方差 σ 。计算区域一般情况下可以采用一个包含该星体的矩形区域, 而本文则是采用二维高斯拟合法通过星体亮度值 H 来确定星体大小的估计值 N , 再由 N 值与高斯拟合函数的半峰全宽 $FWMH$ 乘积得到计算圆域的半径, 本文的源提取程序模块中就是采用这种方法来得到修正矩方法的计算区域。

2.3.3 相对星等计算

对天球定位而言, 星体最重要的两个信息是方位和星等。一般而言亮度越高, 选定的星表中星体的位置精度也就越高, 对于天球定位的计算也就越有意义。对观测图像中提取定位的星体目标进行相对星等排序, 选择亮星目标进行恒星识别和天文位置解算, 可以提高天球定位的精度。

当星体亮度高时, 星体子图内的信噪比会提高, 其定位精度将会提升。在本文中, 为了使用高信噪比的星体数据进行计算, 在匹配识别时, 优先选择高亮度的星体目标进行。为此, 需要对提取、定位的星体目标赋予一个亮度属性, 即相对星等属性。利用基于灰度的相对星等计算可以对提取星体的亮度进行估算, 如式 (2-15):

$$B = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f(x,y)}{mn} \quad (2-15)$$

式中 (m, n) ——星体子图的尺寸;

B ——星体目标的亮度估算。

然后利用式 (2-16) 来计算星等:

$$V = V_0 - 2.5 \lg\left(\frac{B}{t}\right) \quad (2-16)$$

式中 V ——相对星等;

t ——曝光时间;

V_0 ——一个近似值, 随着观测环境和观测时间的不同而不同, 大概变化范围是 20~20.5, 与 B 存在着对应关系;

在实际应用中, 只需要对 CCD 图像中高亮度的星体进行匹配识别, 所以利用式(2-15)估算获取的星体亮度来对提取、定位的星体目标进行排序即可。

在本文实际应用中, 使用 JAVA 编写 findstar 类, 通过对 FITS 图像进行简单预处理后, 利用基于灰度阈值法进行星图分割以及 4 连通域法进行星体目标提取, 再结合二维高斯拟合及二维修正矩的亚像素定位法就能得到星体目标中心的像素坐标, 同时利用基于星体目标灰度值获得星体的相对星等。最终可以得到由相对星等值进行升序排列的星体的 x, y 亚像素坐标值, 该结果保存在 .stars 文本中。

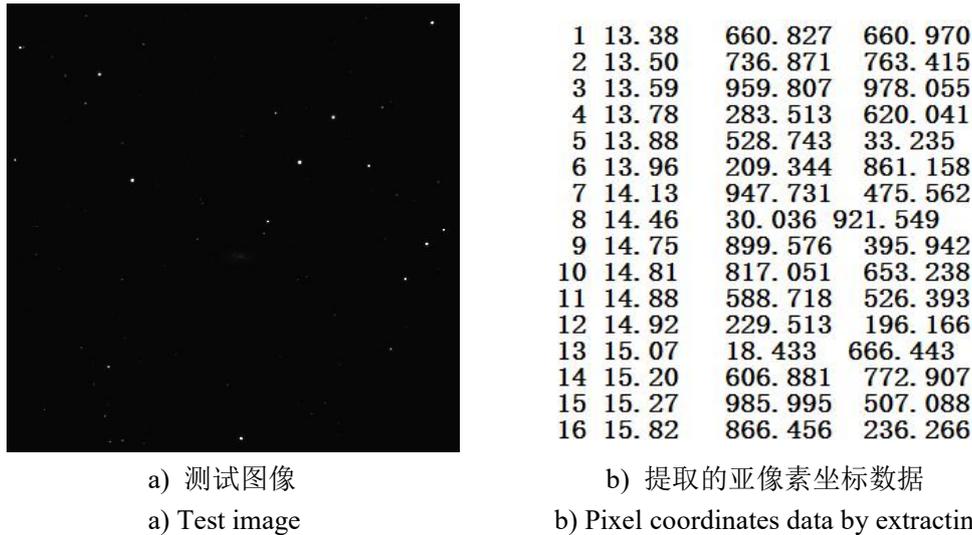


图 2-10 星体亚像素提取 (b 图中第 2 列是恒星相对星等, 3、4 列是 x、y 亚像素坐标)
 Fig.2-10 Astral subpixel extraction(The second column on the right is the relative magnitude of the stars, and the third and fourth columns are the x, y subpixel coordinates)

表 2-1 亚像素坐标对比表
 Table2-1 Subpixel coordinates comparison

编号	二维修正矩法		SExtractor	
	x 坐标	y 坐标	x 坐标	y 坐标
1	660.827	660.970	660.784	660.996
2	736.871	763.415	736.857	763.457
3	959.807	978.055	959.809	978.114
4	283.513	620.041	283.496	620.094
5	528.743	33.235	528.730	33.254
6	209.344	861.158	209.324	861.208
7	947.731	475.562	947.733	475.568
8	30.036	921.549	30.135	921.530
9	899.576	395.942	899.564	395.918
10	817.051	653.238	817.016	653.281
11	588.718	526.393	588.697	526.388
12	229.513	196.166	229.613	196.072
13	18.433	666.443	18.391	666.453
14	606.881	772.907	606.844	772.879
15	985.995	507.088	985.976	507.093
16	866.456	236.266	866.414	236.193

图 2-10 中, a)是一副 1024×1024 的 16 位 FITS 图像,b)为从 a)中提取的星体相关坐标数据。通过 SExtractor 源提取器的默认配置文件对该图像进行目标源提取, 抽取最亮的 16 颗星与本文数据进行对比, 如表 2-1 所示, 通过分析可以发现在 x 方向, 二者之间的偏差在 0.1 个像元以下, 在 y 方向的偏差在 0.2 个像元以下, 满足本文需求。

2.4 FITS 图像识别与参考星表选定

通常在用 CCD 相机拍摄一张天文图像后，会得到望远镜视轴对应天区的中心天球坐标，利用这一坐标值以及相机的视场大小可以大致确定某一星表中与 FITS 图像对应的大概参考位置或者导航位置。参考星表中的恒星本文称为参考星，与其相关的各种信息包括星等、赤经、赤纬等都是已知的。而由光学系统拍摄得到的天文照相图片中未知的恒星称为目标星或待测星。FITS 图像识别的根本目的就是寻找具有唯一度量的特征量，将光学系统获取的未知恒星与参考星表中的已知恒星进行匹配，确定目标星与参考星之间的对应关系，从而获得进行天体测量所需的恒星信息，如图 2-11 所示为 FITS 图像识别原理图。

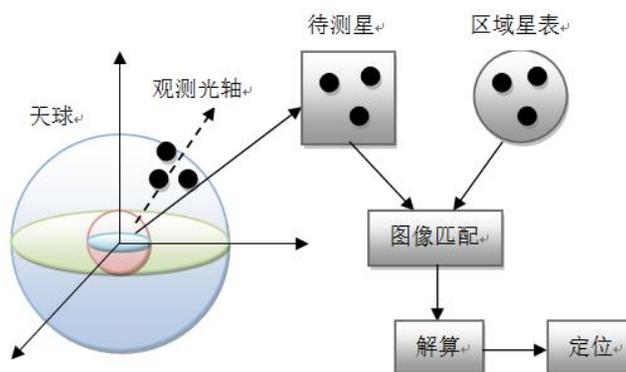


图 2-11 FITS 图像识别原理图

Fig.2-11 Schematic of star pattern recognition

通过对几种常用匹配算法（三角形算法、栅格算法、匹配组算法等）的研究，三角形匹配简单易于实现，是目前主要使用的方法。在三角形匹配中，在参考星表由星体位置构建的三角形为星表三角形，观测图像中目标星体构建的三角形为观测三角形^[56]。为了减小三角形的存储空间，本文只采用较亮的恒星建立三角形。同时，在一定星等范围内星体越亮，对应参考星表中恒星的位置精度就越高，所以该方法也有利于采用位置精度较高的恒星进行匹配。另外，针对三角形匹配时可能会产生多重匹配的问题，需要检测每个观测三角形匹配上的星表三角形个数。对于匹配到星表三角形多于 1 个的观测三角形直接进行舍弃。

2.4.1 参考星表的建立

参考星表是按照自身需求（如较高的参考精度、星表的容量、恒星的密集度等）通过筛选常用的一些星表，然后按照一定方法计算出匹配时要使用的特征值，再按照一定的规律存储起来而获得的。这些星表是人们经过长期观察测量获得的恒星位置信息，恒星虽然在做运动但是由于距离我们较远，这些变化在一定的范围内是可以忽略不计的。通常，星表按照恒星亮度和位置区分不同的恒星，一个星表所包含的恒星亮度越低就证明这个星库所包含的恒星数量就越多。为了便于

计算恒星的实际位置，几乎所有的星表中都包含了恒星自行信息与基本天文坐标系下的特定时刻的位置信息，这样通过查找天文年历就可以方便的计算出恒星的实际位置。另外，还可以通过适当的坐标转换来获得不同坐标系下恒星的位置坐标，通常的星表中都会包含多种坐标系下的位置信息方便不同需要的任务来查找恒星信息。常用的天文星表主要包括 SAO 星表、NASA 星表、Hipparcos 星表等。表 2-2^[57,58]列出了常用星表基本特性。

本文选择 Hipparcos 星表作为参考星表，其中含有 118218 个恒星的赤经、赤纬、自行、岁差等信息，总容量 50.8MB。由于星表中信息量大，如果把所有的恒星都作为识别对象，在识别过程中不仅将产生庞大的计算量、占用较多的存储空间，而且由于干扰因素的增多，会大大的提高“失配”的概率。因此，在利用基本星表建立参考星表之前，必须对星表进行预筛选，得到参考星。此处利用观测望远镜的 CCD 固有参数，即视轴方向坐标与观测视场大小，将星表的范围缩小到星图对应天区的位置。通过编程实现对应星表中的恒星数据的加载，构建参考星几何三角形。

表 2-2 常用星表的基本特性

Table2-2 The basic characteristics of commonly used catalogs

星表编号	星表名称	编者/出版年代	星表历元	总星数	星表精度度/arcsec	分布密度 star/sep.deg
I/149	FK5	Fricke/1988	J2000.0	1535	0.02	0.037
I/131A	SAO	SAOStaff/1995	J2000.0	258977	1.0	6.267
I/271	CSC2.2	Stscl/2001	J2000.0	455851237	0.3	1031.060
I/239	Hipparcos	ESA/1997	J2000.0	118218	0.0008	2.861
I/259	Tychor2	Hog/2000	J2000.0	2539913	0.007	61.463

不管采用何种方式建立参考星表，都需要从基本星表中提取恒星的位置信息。Hipparcos 星表中存储的是恒星在标准历元（J2000）的平赤道位置，而 CCD 望远镜所拍摄的是恒星的视位置，本文需要把平位置的坐标转换到视位置。

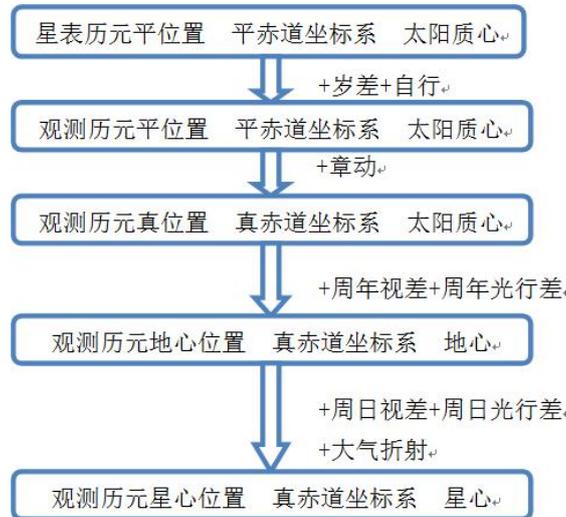


图 2-12 恒星视位置计算流程示意图

Fig.2-12 Flow diagram of star apparent position calculation

由于受“岁差”、“章动”、“自行”等因素的影响，恒星的视位置和平位置有较大差别，需要先对基本星表进行修正。这个过程有多种方法可以实现其一般流程如上图 2-12 所示。

2.4.2 三角形匹配算法分析实现

三角形匹配的原理是三角形全等，即观测三角形和星表三角形为全等三角形，则认为两者相互匹配。判定两个三角形全等的方式有：边—边—边，边—角—边，角—边—角，角—角—边。本文采用“边—边—边”的匹配方法，如图 2-13 所示，若观测三角形的三条边和星表三角形的三条边在一定误差范围下相等则认为匹配成功。图中的边指的是星对角距，即球面坐标系中对应的大圆弧弧长。设 r^{12} 、 r^{13} 和 r^{23} 为观测三角形的三条“边”，设 $r(i, j)$ 、 $r(i, k)$ 和 $r(j, k)$ 为星表三角形中的三条“边”，三角形“边”的具体归算方法分别如下：

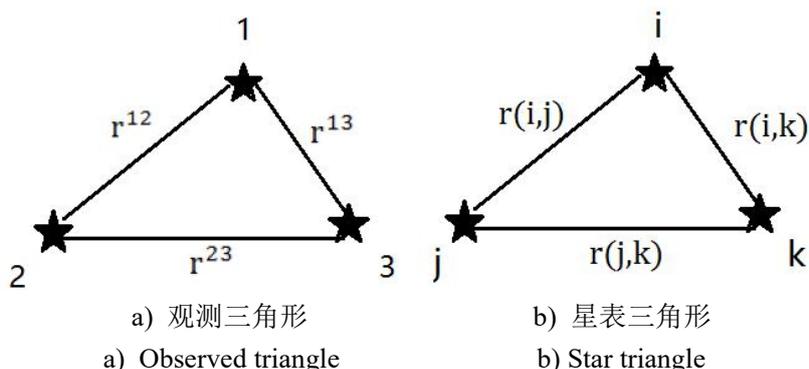


图 2-13 三角形匹配原理图

Fig.2-13 The principle diagram of triangle matching

(1) 设 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 分别为 CCD 观测图像中不在同一直线上任意三颗星的像素坐标。由余弦定理可知每颗星的星对角距(r^{12} 、 r^{13} 、 r^{23})的大小分别为：

$$\begin{cases} r^{12} = \arccos\left(\frac{R_{10}^2 + R_{20}^2 - R_{12}^2}{2R_{10}R_{20}}\right) \\ r^{13} = \arccos\left(\frac{R_{10}^2 + R_{30}^2 - R_{13}^2}{2R_{10}R_{30}}\right) \\ r^{23} = \arccos\left(\frac{R_{20}^2 + R_{30}^2 - R_{23}^2}{2R_{20}R_{30}}\right) \end{cases} \quad (2-17)$$

式中 (R_{10}, R_{20}, R_{30}) ——每颗星到天球球心的距离，其中，CCD 中心为 CCD 与天球的切点，天球半径为单位长度；

(R_{12}, R_{13}, R_{23}) ——三颗星中任意两颗星之间的距离。

(2) 设 (α_i, δ_i) 、 (α_j, δ_j) 、 (α_k, δ_k) 分别为星表中不在同一直线上任意

三颗星的赤道坐标。计算方法原理类似观测星三角形，得到星表三角形三条边的星对角距：

$$\begin{cases} r(i, j) = \arccos(\cos \delta_i \cos \delta_j \cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin \delta_i \sin \delta_j) \\ r(i, k) = \arccos(\cos \delta_i \cos \delta_k \cos(\alpha_i - \alpha_k) + \sin \delta_i \sin \delta_k) \\ r(j, k) = \arccos(\cos \delta_j \cos \delta_k \cos(\alpha_j - \alpha_k) + \sin \delta_j \sin \delta_k) \end{cases} \quad (2-18)$$

在分析三角形匹配方法原理的基础上，本文设计程序实现过程如下：

(1) 依据观测天区的中心指向及观测视场的大小由 Hipparcos 星表得到观测天区恒星的观测位置即参考星表位置。

(2) 建立参考星表三角形。使用式 (2-18) 计算星表三角形的“边”，并建立星表三角形的信息库，对于构建的三角形均记下 $r(i, j)$ 、 $r(i, k)$ 、 $r(j, k)$ 以及 (α_i, δ_i) 、 (α_j, δ_j) 、 (α_k, δ_k) ，且有 $d(j, k) \geq d(i, j) \geq d(i, k)$ 。采用较亮的恒星构建星表三角形以减少存储空间，并将构建的星表三角形依据 $r(j, k)$ 的大小按从大到小的顺序进行排列。

(3) 建立观测三角形。利用式 (2-17) 计算观测三角形的三边弧长并建立观测三角形的信息库，对每个观测三角形均记录下信息 r^{12} 、 r^{13} 、 r^{23} 以及 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 。同样，对观测三角形信息库中的所有三角形依据每个三角形弧长 r^{12} 的大小按照从大到小的顺序排列。为了提升匹配的速度，只采用观测图像中相对星等较亮的前 n 颗星建立弧长库，此处， n 小于等于 20。

(4) 将观测三角形信息库中的三角形依次和星表三角形信息库中所有三角形进行匹配，当两者三边弧长相等时则认为匹配成功。然而实际观测图像会受到各种因素的影响，相同三颗星的参考星表三角形和观测三角形的三条边可能不完全相等。所以当对应三条边的差值小于一定范围时即可认为三角形三条边相等。即当满足 $|d(j, k) - d^{12}| \leq \epsilon$ 、 $|d(i, j) - d^{13}| \leq \epsilon$ 、 $|d(i, k) - d^{23}| \leq \epsilon$ 则认为匹配成功。

若存在一个观测三角形有多个星表三角形均匹配成功，则舍掉该观测三角形的匹配结果。对于匹配成功的三角形，分别记录该三角形三颗恒星的图像坐标和天球赤道坐标。

按照上述步骤进行程序编写 MatchStars 类，利用三角形匹配算法建立观测图像中定位出的高亮度星体目标的图像亚像素坐标与天球赤道坐标的对应表。通过对测试星图进行匹配，结果如图 2-14 所示。图 b) 中匹配到的数据保存到 .match 的文本中。

第3章 基于 WCS 的天球定位分析及实现

3.1 引言

天球定位主要是为了精确地处理多颗星的影像,并获得这些星在图像中的像素坐标(p_1, p_2),经前文图像识别后,得到这些星在参考星表中的对应恒星,以及它们的天球坐标。得到了两个坐标系:像素坐标(p_1, p_2)和对应的天球坐标(α, δ)。通过本章 WCS 计算,可以得到两个坐标系之间的坐标转换函数。进一步即可将 CCD 图像中某一点的像素坐标转换为天球坐标,完成整个图像中所有目标的天球定位。定位精度的高低,一方面取决于亚像素定心精度,另一方面取决于坐标转换函数。

目前 FITS 图像文件头中,用于像素坐标向天球坐标转换的关键字分别为:CRPIX $_j$ (j 轴参考点像素坐标)、CRVAL $_i$ (i 轴参考点天球坐标)、CTYPE $_i$ (i 轴的天球坐标系及投影方式)、CDELT $_i$ (第 i 轴上像元间的物理坐标间隔)、PC $_{i_j}$ (像素坐标到物理坐标的旋转矩阵)、CROTA $_j$ (第 j 个物理坐标轴相对于像元坐标的旋转角)。当然,还有其它一些辅助参数也参与到了转换计算的过程中,重要参数变量的汇总如表 3-1 所示。

表 3-1 计算天球坐标的重要变量汇总

Table 3-1 The summary of important variables for calculating celestial coordinates

变量	含义	WCS 关键字
i	世界坐标的索引变量	
j	像素坐标的索引变量	
p_j	像素坐标	
r_j	参考像素坐标	CRPIX $_j$
m_{ij}	线性转换矩阵	CD $_{i_j}$ 或 PC $_{i_j}$
s_i	坐标系数	CDELT $_i$
x_i	过渡性质的世界坐标系	
(x, y)	投影平面坐标	
(\emptyset, θ)	本地天球 (native celestial) 坐标系下的赤经赤纬	
(α, δ)	实际天球坐标系下的赤经赤纬	
(\emptyset_0, θ_0)	参考点在本地天球坐标系的赤经赤纬	PV $_{i_1}$, PV $_{i_2}$
(α_0, δ_0)	参考点在实际天球坐标系的赤经赤纬	CRVAL $_i$
(\emptyset_p, θ_p)	天球极点再本地天球坐标系的赤经赤纬	LONPOLE, LATPOLE
(α_p, δ_p)	本地天球极点的实际天球坐标系的赤经赤纬	

3.2 天球空间直角坐标系转换

除球面坐标系外,也可以使用空间直角坐标系。空间直角坐标系的原点就是天球的中心,因此它是任意的,通常取在地心或日心(或太阳系质心)。空间直角坐标系的几何框架(x 、 y 、 z)则和天球的基本点、圈联系在一起。采用直角坐标系的好处是:天体在不同坐标系的位置转换,通常采用矢量矩阵转换方法,这种方法比较直观简单而且能保证精度,尤其是由于观测精度的提高和电子计算机的采用,空间直角坐标系优越性要明显的多。

FITS 图像的坐标系表示主要是赤道坐标系(RA, DEC)、黄道坐标系(ELON, ELAT)、银道坐标系(GLON, GLAT)^[59]。本文所有计算都是在天球赤道坐标系下进行的。

3.2.1 赤道直角坐标系

取天球中心 O 为空间直角坐标系原点,取 Z 轴正向指向北天极 P ,取 X 轴正向指向春分点 r ,取 X 轴沿着天赤道逆时针(右旋) 90° 的地方为 Y 轴,构成右旋直角坐标系如图 3-1。

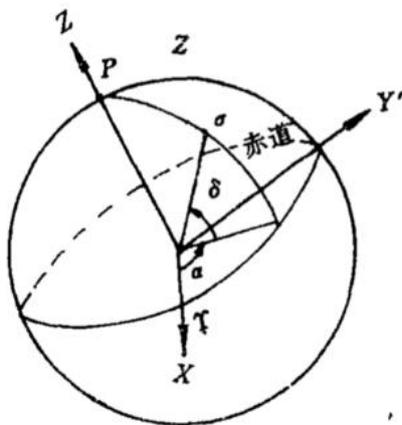


图 3-1 赤道直角坐标系

Fig.3-1 Equatorial system of coordinates

天体 σ 在空间赤道直角坐标系的位置用 (x, y, z) 确定。

同一时刻同一天体的空间直角赤道坐标 (x, y, z) 与球面赤道坐标 (α, δ) 的关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\alpha, \delta} = \begin{bmatrix} \rho \cos \delta \cos \alpha \\ \rho \cos \delta \sin \alpha \\ \rho \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

式中 ρ ——天体距坐标系原点的距离。

3.2.2 空间直角坐标系的转换

天体 σ ，在空间直角坐标系的位置，由一个坐标系转换到另一个坐标系是通过坐标系的旋转得到的，而坐标系的旋转是用变换矩阵（或称旋转矩阵）表示^[42]。

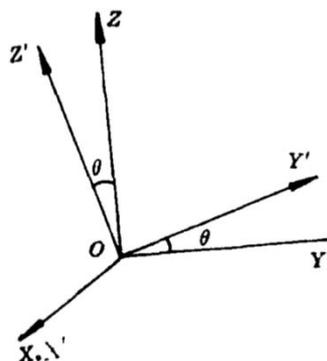


图 4-2 坐标系转换示意图

Fig.4-2 The diagram of Coordinate system transformation

图 4-2 中，令轴 X 不动，ZOY 平面绕 X 轴右旋一个角度 θ ，构成新的坐标系 O-X'Y'Z'。由解析几何的知识，可得 (x, y, z) 和 (x', y', z') 的矩阵形式的关系式：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

令 $K_x(\theta)$ 为上式的三阶矩阵。同样，XZ 平面绕 Y 轴逆时针旋转 θ 角的变换矩阵和 XY 平面绕 Z 轴逆时针旋转 θ 角的变换矩阵为：

$$K_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$K_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

几个变换矩阵之积如： $K_x(\alpha) K_y(\beta) K_z(\gamma)$ 它们间的顺序是不能变换的，其计算结果依次从右至左完成。 $K_x(\alpha) K_y(\beta) K_z(\gamma)$ 表示先对原系统 z 轴旋转 γ 角，然后对旋转了 γ 角的系统的 y 轴，绕其旋转 β 角，然后再对再次旋转后的系统 x 轴，再绕其旋转一个 α 角，经过这样的过程才能得到变换后的系统。

转换关系式得出是遵循下述转换原则：

(1) 首先考虑原坐标系的 Z 轴，如果能先绕 Z 轴旋转就先 Z 轴，否则考虑 Y 轴，其顺序是 ZYX。原因是 Z 轴对应天球坐标系中的基本极。

(2) 旋转角 θ 正负号由原坐标系计量原则定, 原左旋顺时针为正, 右旋逆时针为正。

3.3 WCS 坐标转换的算法分析

WCS 坐标系的建立主要分两个部分: 第一、像素平面坐标系到世界坐标系或量测坐标系(即投影平面)的转换; 第二、世界坐标系到天球坐标系的转换, 在这一转换过程还需建立一过渡性坐标系统, 称为本地天球坐标系(Native Spherical Coordinates), 以便将物理平面坐标与天球坐标建立联系。坐标系建立流程如图 3-3 所示。

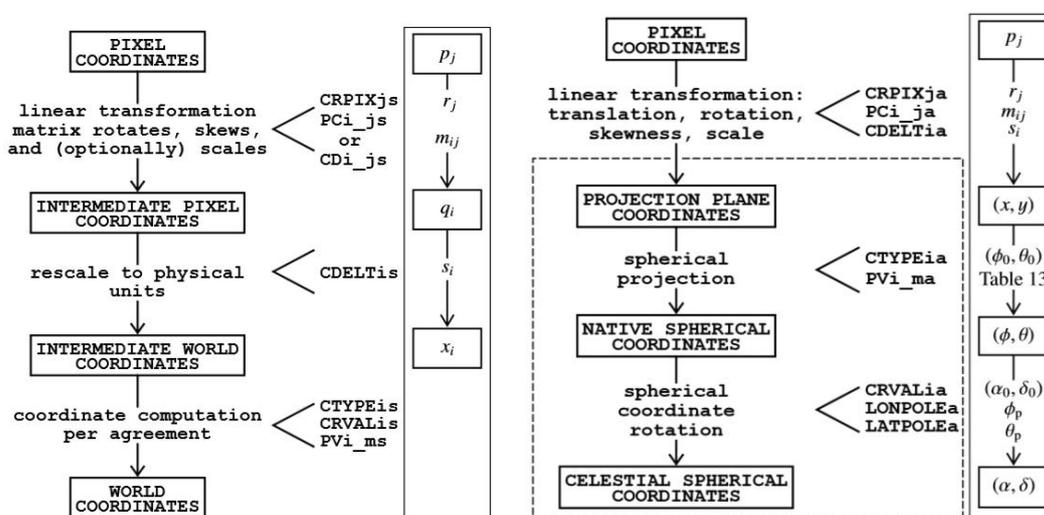


图 3-3 WCS 坐标转换流程^[5,6]

Fig.3-3 The flow chart of coordinate transformation by WCS

3.3.1 像素平面坐标系与世界坐标系的转换分析

由图 3-3 (左) 可以看出, 在像素坐标到世界坐标的转换过程中经历了两次过渡。首先是像素坐标到中间像素坐标 (intermediate pixel coordinate) 的转换:

$$q_i = \sum_{j=1}^N m_{ij} (p_j - r_j) \quad (3-5)$$

式中 i ——世界坐标 (或量度坐标) 的索引变量;

j ——像素坐标的索引变量;

p_j ——像素坐标;

N ——坐标轴的总数, 由关键字 NAXIS 给出, 本文研究对象都是二维 FITS 图像, N 的值为 2;

r_j ——第 j 坐标轴的图像参考点像素坐标, 由关键字 CRPIXj($j=1,2,\dots$)给出,

它是个浮点数，因此参考像素位置可能并不对应一个实际的像元，如 129.5 或-3 的值也是可以接受的；

m_{ij} —— $i \times j$ ($i=j$) 的非奇异矩阵，可逆，由关键字 PCi_j 给出，缺省值 $PCi_j=1$ ($i=j$)， $PCi_j=0$ ($i \neq j$)；

q_i ——像素坐标到中间像素坐标转换的一个偏移量向量，它是一个无量纲的像素单元。

其次是中间像素坐标到世界坐标的转换计算：

$$x_i = s_i q_i \quad (3-6)$$

s_i 由关键字 $CDELTi$ 给出，表示第 i 轴上像素间的物理坐标间隔，即是物理坐标的增量，如同 FORTRAN 中的计数以 1 为增量，它必须为非零值。两个向量对应元素之间相乘得到中间世界坐标向量 x_i ($i=1,2,\dots$)。

联合公式 (3-5)、(3-6)：

$$x_i = \sum_{j=1}^N (s_i m_{ij})(p_j - r_j) \quad (3-7)$$

$s_i m_{ij}$ 二维矩阵表示世界坐标在 x 、 y 两个坐标轴方向的变化率系数，可以直接由 CDi_j (浮点数) 关键字给出， CDi_j 矩阵必须是非奇异的并且可逆。此处值得注意的是，在 FITS 图像文件头中不能同时存在 CDi_j 和 PCi_j 关键字。

第三步计算世界坐标的过程取决于 $CTYPE_n$ 。对于投影平面中简单的线性轴， x_i 被作为偏移量系数直接与参考点的坐标值相加，这里的参考点坐标是由 $CRVAL_n$ 关键字给出。对于非线性坐标系统， $CTYPE_n$ 定义了一个由 x_i 、 $CRVAL_n$ 及其他参数构建的函数式来对世界坐标进行计算，这里的函数式早已经被 AIPS 规定并加以约束^[7,8]。本文处理的 FITS 图像为二维，此处将 $s_i m_{ij}$ 以 CDi_j 表示，则像素坐标到世界坐标的转换用 WCS 关键字可表示为：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CD1_1 & CD1_2 \\ CD2_1 & CD2_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 - CRPIX1 \\ p_2 - CRPIX2 \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

3.3.2 世界坐标系与天球坐标系的转换分析

通过第一部分的计算，对于投影平面上简单的线性轴可以求得像素点的世界坐标，而对于非线性坐标系统，也能计算出像素的过渡世界坐标。接下来便能利用 (中间) 世界坐标计算天球坐标。通过图 3-3 (右) 可以看出，对于这两个坐标系之间的转换可以划分为两个步骤：第一、投影平面坐标 (projection plane coordinate) 到本地天球坐标 (native spherical coordinate) 的转换计算；第二、本地天球坐标旋转 (rotation) 到天球坐标 (celestial spherical coordinate) 的转换计算。此处，

本地天球坐标是一种自定义的天球球面坐标,它与天球坐标的转换可以理解为两个天球空间坐标系间的旋转转换。

如图 3-4 所示, $O-xyz$ 为天球赤道坐标系, $O-XYZ$ 为自定义的本地天球球面坐标系, PJ 为投影平面, OZ 可以看作是 CCD 相机的主光轴。

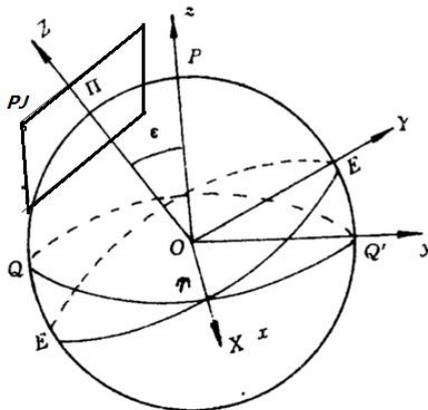


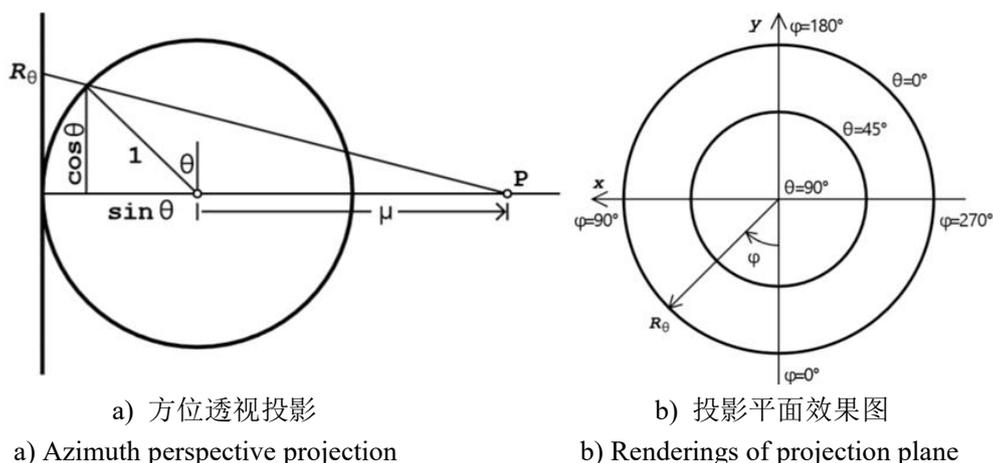
图 3-4 世界坐标与天球坐标转换示意图

Fig.3-4 The transformation between world coordinate and celestial spherical coordinate

为了探讨投影平面与本地球面坐标系的关系,可以运用反向思去思考:天球赤道坐标系(由 CTYPEi 前 4 个字符标记,这里是 RA 和 DEC)下的某一块区域($\alpha: 6h-7h$, $\delta: 30-40$ 度),它的参考点坐标是($\alpha_0: 6.5h$, $\delta_0: 35^\circ$)可以从 CRVAL1, CRVAL2 获得(如表 1)。为了降低计算复杂度,定义了一个中间过渡的本地球面坐标系,假设这个坐标系的北极点正好交于区域的参考点(α_0, δ_0)。这时,在赤道坐标系下的这块区域成为了本地球面坐标系下的极点附近的一块区域,且本地球面坐标系的北极点在赤道坐标系下的坐标(α_p, δ_p)=(α_0, δ_0),参考点在本地球面坐标系中的纬度 $\theta_0=90^\circ$ 都可以得到。根据地球投影理论,对于本地球面坐标系北极附近的区域,要想投影得到的平面图畸变很小,要用到方位投影(Zenithal (azimuthal) projections)中的方位透视投影(Zenithal perspective)(如图 3-5),投影方式用 CTYPEi 最右边的 3 个字符标记。在投影平面上建立笛卡尔坐标系,获得不同点的坐标(x,y)(其实就是第一部分已经求到的世界坐标)。

通过这种理解方式,可以清晰投影平面坐标到本地球面坐标的转换,就是将(x,y)转换为本地球面坐标的经度与纬度(ϕ, θ)。其中所用到的转换函数取决于 CTYPEi 中的投影方法,不同的投影所用到的参数也不同。

投影平面坐标到本地天球球面坐标的转换计算的关键在于球面到平面的投影方式。WCS 主要的投影方式包括方位投影(Zenithal projections)、圆柱投影(Cylindrical projections)、圆锥投影(Conic projections)^[47, 48]。



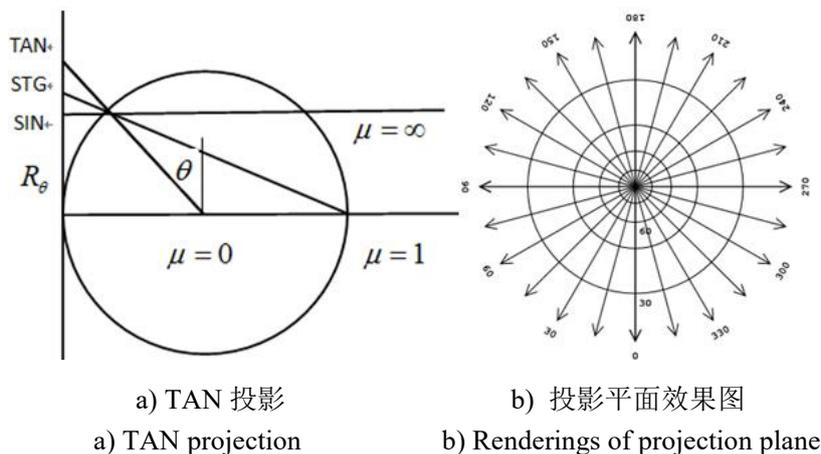
a) Azimuth perspective projection b) Renderings of projection plane

图 3-5 方位透视投影示意图

Fig.3-5 Illustration azimuth perspective projection

3.3.2.1 方位投影 (Zenithal projections)

方位投影是将本地球面坐标系统的极轴垂直于投影平面图像的参考点，投影平面与球面可以相切也可以相割，这里只考虑相切的情况。本地球面的纬线投影到平面为同心圆，经线映射为间隔相同的向外发散的射线。以极轴延长线上的某一点为视点，根据视点与球心距离的不同，可以将方位投影分为球心投影(TAN)、球极平面投影(SIG)、正射投影(SIN)等。根据投影后投影平面的一些特点，如纬线间的距离相等为等距方位投影(ARC)，如各网格的面积相等为等积方位投影(ZEA)等等。在 FITS 图像中，以球心投影最为常用（如图 3-6）。



a) TAN projection b) Renderings of projection plane

图 3-6 TAN 投影示意图 (u=0)

Fig.3-6 The schematic diagram of TAN projection(u=0)

TAN 投影主要应用于可见光的数据图像， $\mu = 0$ 。由于所有方位投影都是以本地球面的极轴穿过平面图像参考点建立起来的，因此可以统一设定图像参考点在本地球面坐标系中的坐标 $(\phi_o, \theta_o)_{zenithal} = (0^\circ, 90^\circ)$ 。

将投影平面上某一点到圆心的距离设为半径 R_θ ，这样就可以建立 (ϕ, θ) 与 (x, y) 的关系：

$$\begin{cases} x = R_\theta \sin \phi \\ y = R_\theta \cos \phi \end{cases} \quad (3-9)$$

逆运算可求得：

$$\phi = \arctan(-y, x) \quad (3-10)$$

$$R_\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3-11)$$

$$R_\theta = \frac{180^\circ (\mu + 1) \cos \theta}{\pi (\mu + \sin \theta)} \quad (3-12)$$

当 $\mu=0$ 的时候（TAN 球心投影）：

$$\begin{cases} \phi = \arctan(-y, x) \\ R_\theta = 180^\circ / \pi \cot \theta \\ \theta = \tan^{-1}(180^\circ / (\pi R_\theta)) \end{cases} \quad (3-13)$$

式中 (ϕ, θ) ——本地天球坐标；

(x, y) ——像素平面坐标（世界坐标）；

R_θ ——像素平面的投影半径。

对于不同 μ 值对应的投影方式如 SIG、SIN，将其带入公式（3-13）同样可以得到 (ϕ, θ) 。

3.3.2.2 圆柱投影(Cylindrical projections)

假想一个圆柱与天球相切或相割，以圆柱面作为投影面，圆柱的母线与天球极轴重合，将球面上的经纬线投影到圆柱面上（如图 3-7）。 λ 为圆柱的半径系数， μ 为视点到球心的距离系数。在正常位置的圆柱投影中，圆柱面展平后纬线为平行直线，经线也是平行直线，而且与纬线直交。圆柱投影比较适用于 FITS 图像位于本地球面赤道附近的区域，因为在赤道附近的畸变非常小。圆柱投影根据 λ 及 μ 的值的不同可分为：圆柱透视投影 CYP，等积投影 CEA，Plate carr'ee 投影 CAR，墨卡托投影 MER 等。为了直观的理解圆柱投影中坐标转换的关系，以 CAR 及 CYP 投影为例进行说明（如图 3-8）。

在上述所有圆柱投影中，为了简化计算的复杂度，可以设定图像参考点在本地球面坐标系中的坐标为经度纬度都为 0，即 $(\phi_0, \theta_0)_{cylindrical} = (0, 0)$ 。结合图 3-7、图 3-8 及圆柱投影理论可以得到：

$$\begin{cases} x = \lambda\phi \\ y = \frac{180^\circ}{\pi} \frac{\mu + \lambda}{\mu + \cos\theta} \sin\theta \end{cases} \quad (3-14)$$

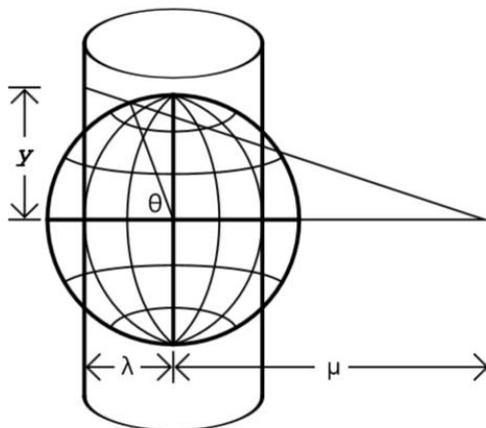
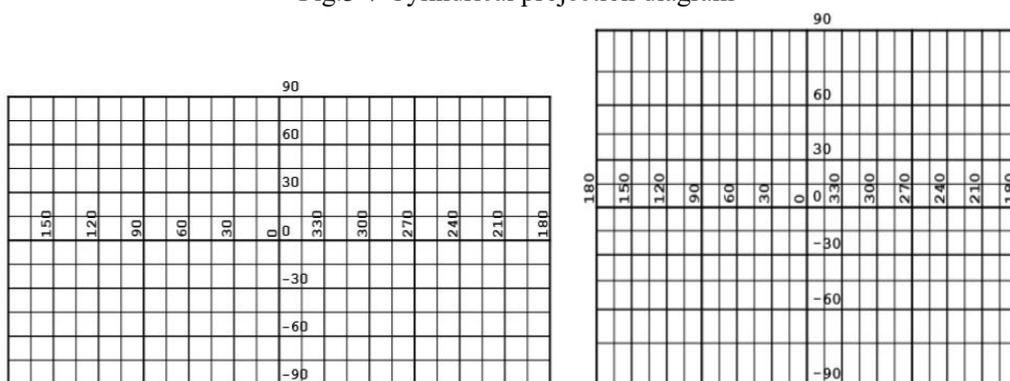


图 3-7 圆柱投影示意图

Fig.3-7 Cylindrical projection diagram



a) CAR 投影平面
a) CAR projection plane

b) CYP 投影平面
b) CYP projection plane

图 3-8 圆柱投影平面效果图

Fig.3-8 Renderings of cylindrical projection plane

逆运算可以得到:

$$\begin{cases} \phi = \frac{x}{\lambda} \\ \theta = \arctan(1, \eta) + \sin^{-1}\left(\frac{\eta\mu}{\sqrt{\eta^2 + 1}}\right) \end{cases} \quad (3-15)$$

式中 $\eta = \frac{\pi}{180^\circ} \frac{y}{\mu + \lambda}$ 。

公式中 μ 的值记录在 PVi_1a, λ 的值记录在 PVi_2a 中, 在缺省的情况下为 1。PVi_1a, PVi_2a 在不同的投影方式下所表达的含义不同, 对于某些投影没有设定 (ϕ_o, θ_o) 的情况下, PVi_1a, PVi_2a 记录的是 (ϕ_o, θ_o) 的值, 在圆柱投影中所

表达的是 λ 和 μ 的值。归根于一点就是不同的投影会用到不同的参数，PVi_1a, PVi_2a 就是记录这些参数的其中两个关键字。对于 CYP 投影，一般 $\mu=1$ ， $\lambda=\sqrt{2}/2$ ，带入到上述公式中可以得到：

$$\begin{cases} x = \phi \sqrt{2} \\ y = \frac{180^\circ}{\pi} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{cases} \quad (3-16)$$

对于 CAR 投影：

$$\begin{cases} x = \phi \\ y = \theta \end{cases} \quad (3-17)$$

天球投影方式不单单只有圆柱投影和方位投影，还有其他一些比如圆锥投影 (conic projections)，伪圆柱及相关投影 (pseudocylindrical and related projections) 等等。不管何种投影方法，总而言之，本文要做的就是如何能够根据 FITS 文件提供的关键字信息快速的计算投影平面坐标到本地球面坐标的转换。

投影方式的选择需根据 CCD 相机的视轴是否过天球球心，以及视轴与拍摄天球球面的角度来决定。如 CCD 相机视轴过天球球心且垂直于视轴与球面交点的切平面，可以选择 TAN 投影，这也是目前多数 CCD 望远镜构建投影的选择。在利用卫星定位地球某地位置时，若卫星相机视轴与地球球面存在夹角可选用 AZP 投影。

选定投影方式后，可以赋值给关键字 CTYPEi。i 的取值范围是从 1 到坐标轴的数量 n，分别指定对应坐标轴的投影特性，其数据结构定义为“4-3”。即 4 个字符加 3 个字符，中间用“-”连接，若字符不够，用“-”补位。前 4 位字符指定坐标轴的类型，后 3 位指定投影方式。例如在 SDSS 提供的 FITS 图像中，图像均为二维图像，其算法统一指定为“TAN”，坐标轴一为 RA，坐标轴二为 DEC。即 CTYPE1 = ‘RA---TAN’，CTYPE2 = ‘DEC---TAN’。

天球坐标系包括地平、时角、赤道和黄道坐标系，本文使用天球赤道坐标系，将其赋值 CTYPEi 前 4 个字节。本地球面坐标 (ϕ, θ) 到天球坐标 (α, δ) 的转换是最后一步计算，转换过程可参看图 4-4。确定本地球面坐标与天球坐标转换关系的参数除了已求得的 (ϕ, θ) 外，还需要本地球面极点在在天球坐标系中的经度和纬度 (α_p, δ_p) (因为本地球面极点一般位于投影平面中心，可以作为参考点，因此该参数确定 CRVALi 的值)、本地球面坐标基准点 (ϕ_0, θ_0) (在方位投影中该值默认为 $\phi_0=0, \theta_0=90^\circ$)、天球坐标基准点 (α_0, δ_0) (方位投影中 $\alpha_0 = \alpha_p, \delta_0 = \delta_p$) 及天球极点在本地球面坐标系中的经度 ϕ_p 。 ϕ_p 赋值给 LONPOLEa (= PVi_3a)。如果 $\delta_0 > \theta_0$ ，LONPOLEa 的缺省值为 0，否则为 180° 。

因此对于方位投影 LONPOLEa 的值总是 180° 。

利用空间直角坐标系转换关系, 给出 ZXZ 的旋转欧拉角为 $(\alpha_p + 90^\circ, 90^\circ - \delta_p, \phi_p + 90^\circ)$, 可得本地球面坐标系与天球坐标系转换公式:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_p + \arctan(\sin \theta \cos \delta_p - \cos \theta \sin \delta_p \cos(\phi - \phi_p), -\cos \theta \sin(\phi - \phi_p)) \\ \delta = \sin^{-1}(\sin \theta \sin \delta_p + \cos \theta \cos \delta_p \cos(\phi - \phi_p)) \end{cases} \quad (3-18)$$

反转公式得:

$$\begin{cases} \phi = \phi_p + \arg(\sin \delta \cos \delta_p - \cos \delta \sin \delta_p \cos(\alpha - \alpha_p), -\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_p)) \\ \theta = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \delta_p + \cos \delta \cos \delta_p \cos(\alpha - \alpha_p)) \end{cases} \quad (3-19)$$

从公式 4-18 和公式 4-19 可以得到一些有用的关系式:

$$\begin{cases} \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_p) = \sin \theta \cos \delta_p - \cos \theta \sin \delta_p \cos(\phi - \phi_p) \\ \cos \delta \sin(\alpha - \alpha_p) = -\cos \theta \sin(\phi - \phi_p) \end{cases} \quad (3-20)$$

$$\begin{cases} \cos \theta \cos(\phi - \phi_p) = \sin \delta \cos \delta_p - \cos \delta \sin \delta_p \cos(\alpha - \alpha_p) \\ \cos \theta \sin(\phi - \phi_p) = -\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_p) \end{cases} \quad (3-21)$$

公式 3-18 和 3-19 是在已知 (α_p, δ_p) 的情况下的应用, 例如方位投影等。而对于圆柱投影及圆锥投影, 它们的 $(\phi_0, \theta_0) \neq (0, 90^\circ)$, 不能确定 (α_p, δ_p) 的值, 因此可以利用 (ϕ_0, θ_0) 来求取, 根据公式 4-20 和 4-21 可得:

$$\delta_p = \arg(\cos \theta_0 \cos(\phi_p - \phi_0), \sin \theta_0) \pm \cos^{-1}\left(\frac{\sin \delta_0}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_0 \sin^2(\phi_p - \phi_0)}}\right) \quad (3-22)$$

$$\sin(\alpha_0 - \alpha_p) = \sin(\phi_p - \phi_0) \cos \theta_0 / \cos \delta_0 \quad (3-23)$$

$$\cos(\alpha_0 - \alpha_p) = \frac{\sin \theta_0 - \sin \delta_p \sin \delta_0}{\cos \delta_p \cos \delta_0} \quad (3-24)$$

结合式 (3-7)、(3-13)、(3-18), 将其中 $s_i m_{ij}$ 用 CDi_j 表示。未知参数包括 $CD1_1$ 、 $CD1_2$ 、 $CD2_1$ 、 $CD2_2$ 、 $CRPIX1$ 、 $CRPIX2$ 、 $CRVAL1$ 、 $CRVAL2$ 八个参数, 将 FITS 图像识别匹配到的 9 组数据代入函数, 其中 (p_1, p_2) 对应像素平面横、纵坐标, (α, δ) 对应同组数据的天球赤经、赤纬。每组数据对应两个多元函数方程, 最终得到 18 组方程。为了提高精度、消除误差, 需组成误差方程式, 进行最小二乘平方差求解, 即求得八个未知参数。结果保存到.wcs 的文本中, 如图 3-9a)所示。目前, 国际上针对 WCS 坐标参数的解算有多种软件能够实现, 主要有 wctools 的 imwcs 模块、Astrometry.net 等, 3-9b)为 Astrometry.net 求取 WCS 的结果。对同一幅测试图像, 将二者取得的 WCS 参数代入前文中建立的坐标系转换函数, 将匹配到的星体目标亚像素坐标代入该函数求得天球坐标, 并对其进行比较, 如表 3-2 所示。由表中数据可以看出, 两种方法得到的天球坐标赤

经上的偏差 0.在 002 度以内，赤纬方向上的偏差在 0.003 度以内，满足本文精度要求。最后利用 fits.jar 包中 Header 类的相关函数将 WCS 信息添加到 FITS 文件中。

为了减少计算量，一般将像素参考点参数 CRPIX_i 先进行赋值，使其为图像中心的像素坐标 (NAXIS1/2, NAXIS2/2)，这样就要求的八个未知量降到了六个，能够很好的提高软件执行效率。

```

testx90maw.wcs - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
CRPIX1 = 514.5470
CRPIX2 = 512.2934
RA = '16:15:56.745'
DEC = '31:25:06.83'
EQUINOX = 2000
EPOCH = 2000
RADECSYS= 'FK5'
CTYPE1 = 'RA---TAN'
CTYPE2 = 'DEC--TAN'
CRVAL1 = 243.986463552
CRVAL2 = 31.418553672
CD1_1 = -0.000178991
CD1_2 = 0.000000681
CD2_1 = 0.000000289
CD2_2 = 0.000178771

FITS header
CRPIX1 = 514.5489
CRPIX2 = 512.2926
RA = '16:15:56.745'
DEC = '+31:25:06.83'
EQUINOX = 2000
EPOCH = 2000
RADECSYS= 'FK5'
CTYPE1 = 'RA---TAN'
CTYPE2 = 'DEC--TAN'
CRVAL1 = 243.986435732
CRVAL2 = 31.418563763
CD1_1 = -0.000179103
CD1_2 = 0.000000679
CD2_1 = 0.000000291
CD2_2 = 0.000178770
IMFCS = '2.6, 9 March 1999, Doug Mink, SAO'

```

- a) 本文 WCS 参数求取结果
 a) The WCS parameter is the result of this article
 b) Astrometry.net 求解 WCS 结果
 b) WCS result by Astrometry.net

图 3-9 WCS 坐标参数求取结果对比

Fig.3-9 Comparing parameter of WCS coordinate by calculating

表 3-2 由 WCS 逆运算得到的天球坐标对比表

Table3-2 The celestial coordinate comparison table obtained by WCS inverse

像素坐标	本文计算结果 天球坐标/deg	Astrometry.net 天球坐标/deg
(660.827, 660.970)	(243.9556589, 31.4450436)	(243.9553537, 31.4456831)
(736.871, 763.415)	(243.9398367, 31.4633060)	(243.9389426, 31.4650278)
(283.513, 620.041)	(244.0347748, 31.4376518)	(244.0356479, 31.4450642)
(209.344, 861.158)	(244.0510993, 31.4819979)	(244.0528799, 31.4820644)
(947.731, 475.562)	(243.8953813, 31.4118855)	(243.9086789, 31.4114531)
(899.576, 395.942)	(243.9054233, 31.3976786)	(243.9087731, 31.3935043)
(817.051, 653.238)	(243.9228622, 31.4436736)	(243.9254565, 31.4453404)
(588.718, 526.393)	(243.9706875, 31.4209918)	(243.9745563, 31.4240458)
(229.513, 196.166)	(244.0458294, 31.3618259)	(244.0465689, 31.3608043)

3.4 本章小结

本章主要研究了 WCS 的算法原理，将 FITS 图像中目标的像素坐标到实际天球赤道坐标的转换划分了两个阶段。首先是像素坐标到世界坐标(量测坐标)的转换，利用相关的 WCS 参数建立二者之间的函数式；其次是世界坐标到天球赤道坐标的转换，值得注意的是这一阶段需要根据所摄天文图像的特点确定球面到

平面的投影方式，并引入了具有中间过渡性质的本地天球坐标系，建立世界坐标与本地天球坐标的函数关系式，再利用空间坐标系之间的转换原理建立本地天球坐标与实际天球赤道坐标的关系。将前文三角形边边边匹配得到的目标星的像素坐标与天球坐标对应数据代入 WCS 建立的函数中，进行最小二乘平方差求解，求得八个未知参数。将这八个 WCS 参数添加到 FITS 图像的文件头中，为本文后续工作提供数据支撑。

第 4 章 FITS 图像格式转换及 AVM 可视化研究

4.1 引言

FITS 是一种灵活的图像传输格式，主要用于存储和传输天文图像。而这种格式文件对于大众来说，是比较陌生的。天文研究人员想将自己获得的精美图像向公众做天文科普，一般是不能把这些图像以 FITS 的格式传递出去。这就需要进行图像格式转换来得到大众随时随地可查看而不需安装特定软件的格式（如 PNG 或 JPEG）。然而转换格式后的图像只是得到了像素信息，而丢失了 FITS 中的重要观测参数、WCS 坐标参数等信息。这就需要将 FITS 文件头中的信息提取出来，用 AVM 标准化的元数据标签进行转换，并添加到 PNG 或 JPEG 的文件头中。

最终获得的 PNG 或 JPEG 格式图像，不仅含有像素信息，而且包含了坐标参数信息。不但能够满足一般科学分析及研究，更对科普教育有很好的普及性。大众可以在通用的图片查看器观看天文图像，在一些支持 AVM 标准的软件中通过解析坐标参数元数据可以直接将图像移动并定位到其所在天区，给人以更直观的视觉体验。

4.2 FITS 图像格式标准

本文中 CCD 观测望远镜拍摄保存的图像格式即为 FITS 格式。FITS 文件是多个记录的序列，一个 FITS 文件包含整数条逻辑纪录，一个 FITS 文件的逻辑记录长度为 23040bits(2880 字节)，每个记录以标题记录开始，标题和图像数据都在一个新的逻辑记录里开始。一个 FITS 文件包含三个部分：主文件头和主数据单元(HDU)、扩展(Extension)和特殊记录(Special Record)，后两者是可选的，它体现了 FITS 格式的灵活性与可扩展性。

FITS 标题用 ASCII 码编辑成每一个开始用一个 8 字符的关键词(keyword)定义信息的类型(80 字符)。标题记录的语法为：keyword = value/comment。每一个头文件必须按顺序含有 SIMPLE、BITPIX、NAXIS、NAXISn 和 END 五个关键词称为基本关键词，它指明了图像的基本信息：

SIMPLE: 逻辑值，只能在主文件头中，T 表示该文件是标准 FITS 文件，否则为 F。

BITPIX: 整数值，表示一个像素所占的位数。其值可为 8、16、32、-32、

-64, 表示图像数据的位宽, 8 表示字符串或无符号二进制整数, 16、32 分别表示 16 位和 32 位补码二进制整数, -32、-64 分别表示 IEEE 单精度和双精度浮点数。

NAXIS: 整数值, 取值范围为 0~999, 表示数据矩阵的维数, 0 表示头文件后没有数据区。

NAXISn: 表示数据矩阵大小即 n 轴的像素个数, 若 NAXIS 值为 0, 则没有这一关键词。

END: 头文件结束标记, 列 9~80 位空。

头文件后紧接着一个新逻辑记录来顺序存放图像数据, 以 FORTRAN-77 规则存储, 高字节在后。这里的图像数据可以为空并不是一定存在的。若图像数据不足 2880 的倍数, 则用 0 值填满。

在关键字 NAXISn 和 END 之间则可以插入其他关键字, 用来记录图像的相关信息称为任选关键词, 它可以记录观测日期 (DATE_OBS)、曝光时间 (EXPTIME)、望远镜名称 (TELNAME)、望远镜焦距 (FOCAL)、望远镜视场 (VIEW)、图像中央的赤经值 (RA)、图像中央的赤纬值 (DEC) 等信息, 这些信息是后续图像识别匹配及 WCS 坐标转换计算的基础, 同时计算后的 WCS 相关关键字也都插入到文件头中。例如以下 FITS 格式图像文件的主要信息:

```
SIMPLE = T //标准 FITS 格式文件
BITPIX = 16 /8 unsigned int, 16 & 32 int, -32 & -64 real //16 位宽度图像
NAXIS = 2 /number of axes //2 维图像
NAXIS1 = 4096 /fastest changing axis
NAXIS2 = 4096 /next to fastest changing axis //图像大小为 4096×4096
BSCALE = 1.0000000000000000 /physical = BZERO + BSCALE*array_value
BZERO = 32768.000000000000 /physical = BZERO + BSCALE*array_value
DATE-OBS = '2010-08-31T13:15:12'/YYYY-MM-DDThh:mm:ss observation
start, UT //观测时间
EXPTIME = 1.0000000000000000 /Exposure time in seconds //曝光时间
TELNAME = yunnan1m / Telescope name
FOCAL = 13000 / Telescope focal length // 单位 mm
VIEW = 45 / telescope field of view // 单位' (角分)
RA = 8:41:48.31 //赤经
DEC = 23:24:11.8 //赤纬
END
```

程序设计者可以获得多种语言的 FITS 文件读写支持, 例如 JAVA、C/C++、Fortran、MATLAB 等语言, 甚至读取文件和读取文件信息的函数已经被包含进

了 MATLAB 软件。而本文基于 JAVA 编写了图像定位及可视化系统,利用 fits.jar 包对 FITS 图像进行读写操作。

4.3 FITS 格式转换分析

FITS 图像中每个像素的灰度范围通常很大 (主要有 8 位、16 位、32 位、64 位、-32 位),而目前操作系统通常只能显示 256 级的灰度范围^[60]。首先要把灰度的变化范围压缩为 0~255。压缩方法有多种,如线性变换、对数变换等^[61]。线性变换与 (自然)对数变换的公式如下:

(1) 线性变换:

$$f(x) = \begin{cases} 0, f(x) \leq m \\ 255 * (x - m) / (M - m), m < f(x) < M \\ 255, f(x) \geq M \end{cases} \quad (4-1)$$

(2) (自然)对数变换:

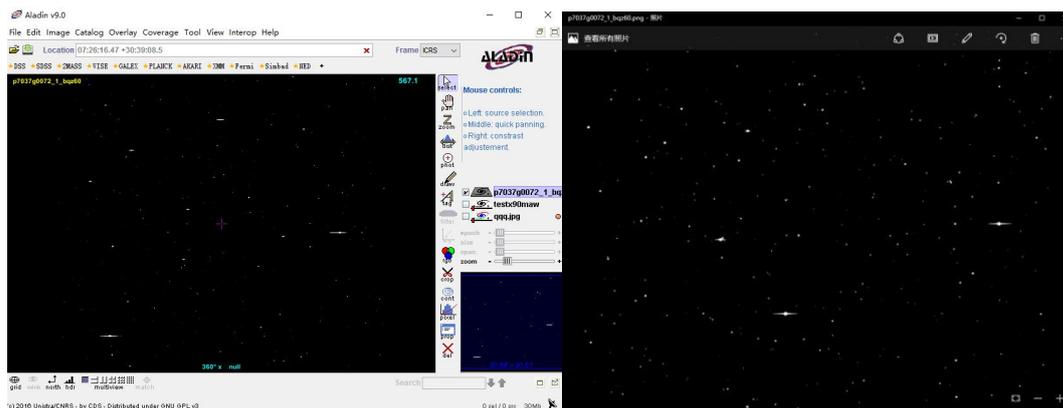
$$f(x) = \begin{cases} 0, f(x) \leq m \\ 255 * (x - m) / (M - m), m < f(x) < M \\ 255, f(x) \geq M \end{cases} \quad (4-2)$$

式中 M ——指定待显示的最大灰度值;

m ——指定待显示的最小灰度值。

然而无论采用哪种变换方法,都会造成信息的丢失,给全面的图像信息显示带来困难。转换过程中的信息丢失,会给某些研究工作带来不便。例如研究星系的合成、双核星系的鉴别等。

本文通过以图像中心为原点设定尺寸范围 $1/3m \times 1/3n$ (m, n 为图像的高、宽),在此范围内遍历像素点寻找在一定阈值下累计最多的像素最小值及最大值,再利用线性变换压缩范围。能够较好的保留信息并提高运行速度。随后,对 FITS 格式进行转换,在 javax 的 imageio 类中有对 PNG 的读写操作,在得到图像数据后能很容易的转到 PNG 格式下。而对于 JPEG,涉及到了压缩方式,本文定义了 writeJPEG(Image img, float qual, boolean RGB, OutputStream os) 函数对其进行写操作。在对 FITS 文件的操作中调用了 fits.jar 包。对 p7037g0072_1_bqz60.fit 图像进行 PNG 格式转换如图 4-1 所示:



a) FITS 格式图像 (Aladin)

b) PNG 格式图像 (照片查看器)

a) FITS format image(Aladin)

b) PNG format image(Photo Viewer)

图 4-1 FITS 与 PNG 格式图像的不同查看方式

Fig.4-1 Different viewing methods of FITS and PNG format images

4.4 基于 AVM 标准的 PNG (JPEG) 图像的 WCS 信息添加

天文可视化元数据 (即 AVM) 标准可以将一幅含有科学数据的图像跨渡 (span) 到一副艺术品插图。这个标准允许在个人图像文件中记录可供搜索的信息, 它是 VAMP (Virtual Astronomy Multimedia Project) 项目的底层构架。该标准是以 XMP (Extensible Metadata Platform) 标准为基础开发而来, 描述了扩展图像元数据模式和嵌入图像文件元数据的方法^[12,13]。

XMP 规范描述了一种广泛应用在图像中嵌入描述性元数据的方法, 在一些通用图像格式 (如 JPEG, TIFF, PNG, GIF, PSD) 文件头中以标签 (tags) 的形式将图像的可用信息进行添加, 而此处的标签就是元数据的一种描述方式, 是 XML (Extensible Markup Language) 文本块的集合。目前, XMP 标准在摄影及出版行业应用广泛。在使用专业相机进行拍摄时, 焦距、曝光、尺寸等相机参数会自动按照 XMP 标准及方法转换为元数据并嵌入到所摄图片中。

天文图像的使用者涵盖了广泛的领域: 教育工作者、学生、记者、爱好者和科学家等等。每个人对图像的需求各不相同, 导致用来描述图像信息的元数据标签多种多样。例如, 当得到一副蟹状星云图像, 其中包含了 x 射线、可见光元素以及用来定位的坐标信息, 以何种标签形式来描述这些信息, AVM 标准建立了很好的机制。鉴于本文研究方向, 此处只考虑坐标信息的标签建立。

对于天文图像的定位, IVOA 简单图像访问规范版本 (Simple Image Access Specification Version) 建立了一整套的 World Coordinate System (WCS) 标签以描述图像的位置、方向、尺寸等信息。其中主要标签有 Spatial.CoordsystemProjection 用来描述投影方式, 由 CTYPEi 后 3 个字节给定; Spatial.Rotation 用来描述图像在天区转角, 由 CROTAi 给定; Spatial.ReferenceDimension 描述图像尺寸, 由

NAXISi 给定；Spatial.Reference Pixel 描述参考像素点坐标，由 CRPIXi 给定；Spatial.ReferencePixel 用来描述参考点天球坐标，由 CRVALi 给定；Spatial.Scale 用来描述象元物理尺寸，由 CDELTi 给定；还包括其他一些基本坐标信息等等。本文通过 JAVA 编程实现将 FITS 文件头的 WCS 信息转换为 AVM 标准化元数据并以 XMP 格式保存（如图 4-2），再调用 exiv2.exe 程序将元数据嵌入到 PNG 文件中。

```

avm:MetadataDate="2016-06-03T14:38:37"
avm:MetadataVersion="1.2"
avm:Spatial.CoordinateFrame="ICRS"
avm:Spatial.CoordsystemProjection="TAN"
avm:Spatial.Equinox="2000.0"
avm:Spatial.Quality="Full"
avm:Spatial.Rotation="-0.15535521827794696"
<avm:Spatial.ReferenceDimension>
  <rdf:Seq>
    <rdf:li>1024</rdf:li>
    <rdf:li>1024</rdf:li>
  </rdf:Seq>
</avm:Spatial.ReferenceDimension>
<avm:Spatial.ReferencePixel>
  <rdf:Seq>
    <rdf:li>514.5489</rdf:li>
    <rdf:li>512.2926</rdf:li>
  </rdf:Seq>
</avm:Spatial.ReferencePixel>
<avm:Spatial.ReferenceValue>
  <rdf:Seq>
    <rdf:li>243.986435732</rdf:li>
    <rdf:li>31.418563763</rdf:li>
  </rdf:Seq>
</avm:Spatial.ReferenceValue>
<avm:Spatial.Scale>
  <rdf:Seq>
    <rdf:li>-1.8128629799739029E-4</rdf:li>
    <rdf:li>1.8094923866709915E-4</rdf:li>
  </rdf:Seq>
</avm:Spatial.Scale>
</rdf:Description>
</rdf:RDF>

```

图 4-2 WCS 元数据 (testx90maw.xmp)

Fig.4-2 WCS metadata(testx90maw.xmp)

4.5 不同可视化实现方法的对比分析

一般要得到带有 WCS 元数据的 PNG（或 JPEG）格式的天文图像，需要几个软件的协作来完成。如本文不含 WCS 相关关键字的测试图像 testx90m.fits，其视场小于 0.7 角分，需要在 Astrometry.net 进行 WCS 参数求解（如图 4-3），将获得的新 FITS 图像利用 Aladin 进行 JPEG 的格式转换，生成 testx90maw.jpg 图像，将此图像通过 AVM Toolkit 进行 WCS 元数据转换并将其嵌入 testx90maw.jpg 图像中。此处需要对照 FITS 文件头中的 WCS 关键字手动输入相关数据，如图 4-4 所示。

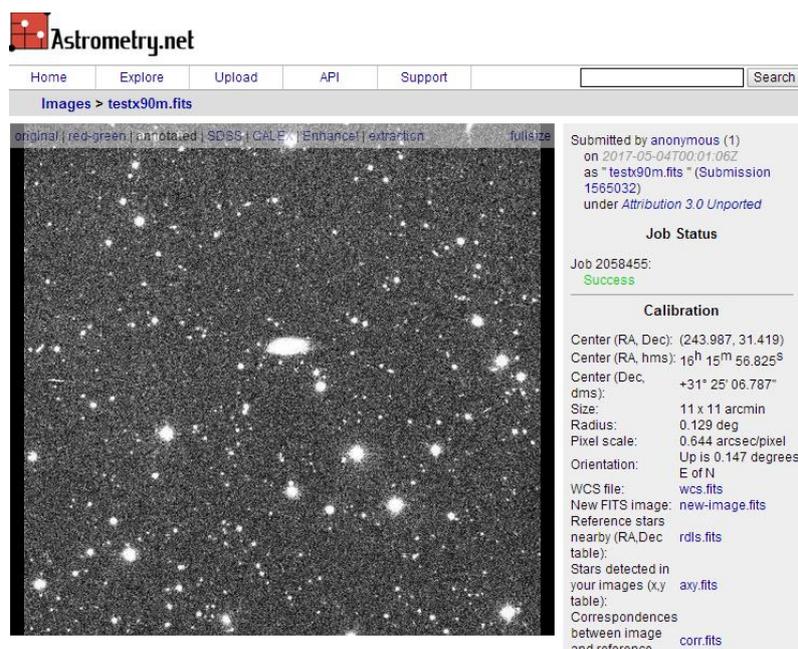


图 4-3 Astrometry.net 对 WCS 参数求解

Fig.4-3 Solution of WCS parameters by Astrometry.net

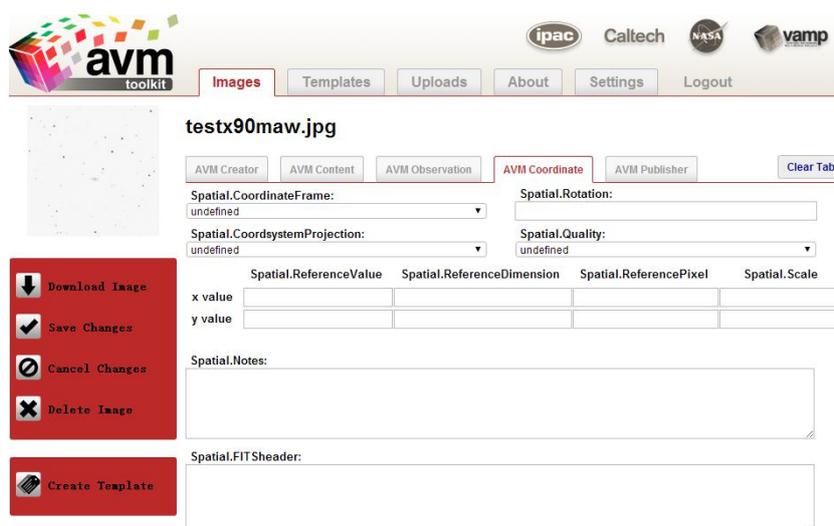


图 4-4 AVM Toolkit 对 WCS 参数添加

Fig.4-4 AVM Toolkit adds the WCS parameters

而本文设计的基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及可视化系统则综合以上步骤，能够自主生成最终需要的图像。通过 WWT（WorldWide Telescope）测试，验证了系统的可行性。结果如图 4-5 所示。其中，WWT 是一架虚拟的望远镜，由微软研究院自 2008 年推出。把世界上各大天文望远镜、天文台、探测器的科学数据都集合在了一起，包括哈勃空间望远镜，斯隆数字化巡天（SDSS），钱德拉 X 射线天文台等等的的数据。微软研究院正在和国家天文台一起努力把中国各大天文台、望远镜的数据，吸纳到 WWT 中。利用 WWT 这架虚拟的望远镜，可以在地球、行星、太阳系、星空之间变换穿行；可以和机遇号等火星车一起在火星上漫步；可以在 SDSS 茫茫星系的海洋中去寻珍猎奇；可以乘着钱德拉巨镜去

探视黑洞的边缘。对于天文数据研究、天文图像可视化、天文科普教育教学有着重要的作用。这款软件支持 AVM 标准，在此可以将前文所得 PNG 图像进行天区定位可视化。

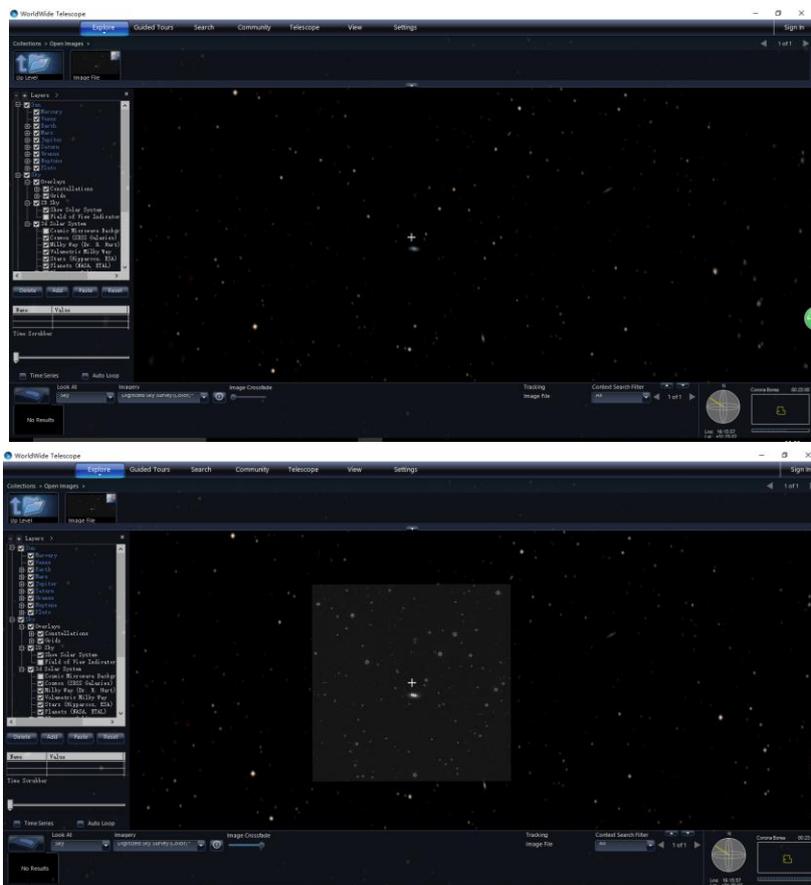


图 4-5 带有 WCS 元数据的 PNG 图像在 WWT 中的可视化

Fig.4-5 The visualization of PNG format image with WCS metadata in WWT

4.6 本章小结

本章研究了 FITS 图像如何在 Windows 环境下进行显示和分析。主要方法是先将 FITS 图像利用改进的线性变换进行灰度压缩；然后将 FITS 与 PNG、JPEG 的图像格式进行转换；最后通过研究 AVM 标准及规范，实现 FITS 文件头中的坐标参数到 PNG、JPEG 中元数据的转化，并利用 WWT 验证了试验结果，实现天球定位及可视化。

第 5 章 FITS 图像定位识别及可视化系统的研制

5.1 系统设计需求

采用 CCD 观测相机获取的观测天区星空图像，会受到天空杂散光和 CCD 观测相机硬件设备的影响而夹杂着很大的噪声，因此首先需对图像进行暗场及平场校正和图像滤波。在成像天区，有时可能存在较小较暗不适用于计算的暗星、较大的非星目标（如星云）或双星目标，这会给图像识别带来不必要的麻烦，因此需去除图像中的暗星、非星目标及双星。准确的星体目标的定位能够提高系统精确度，因此需要对星体目标进行亚像素级的定位。图像中星体目标的匹配识别占据整个处理过程中很大一部分存储空间和处理时间，因此需要空间和时间复杂度响应较低的识别算法。天球定位的重点在于定位的精度及效率，还要考虑后续工作的需要，选择 WCS 算法来建立像素坐标系与天球坐标系之间的位置传递函数，从而获取函数参数（即 WCS 的相关关键字），同时需要将计算得到的 WCS 关键字嵌入 FITS 图像的文件头中。由于本系统需要应对不同位数的灰度图像(如 16 位、32 位、-32 位等)的显示，所用的高位数灰度图像不能直接在 Windows 环境下显示，因此需要合理的对原图像进行映射。考虑到 FITS 格式图像在公众科普中的非通用性，需要对 FITS 格式与 PNG 或 JPEG 的格式进行转换，同时将 WCS 的相关关键字嵌入到 PNG(或 JPEG)图像中，需要选择 AVM 标准对其进行元数据转换。

根据上述分析，本文设计开发的基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及可视化系统需要提供以下功能：

- (1) 图像预处理功能，提高信噪比；
- (2) 星体目标提取并且能够去除暗星和非星目标；
- (3) 精确且稳定的星体亚像素定位；
- (4) 复杂度相对较低的星体识别算法；
- (5) WCS 算法进行天球定位；
- (6) FITS 与 PNG 或 JPEG 的格式转换；
- (7) 基于 AVM 标准的 WCS 参数与元数据的转换；
- (8) 将元数据嵌入 PNG(或 JPEG)图像中。
- (9) 完善的高动态范围图像显示功能和良好的用户交互式操作界面；

5.2 系统结构设计

根据系统的功能需求及本文应用条件的分析，基于 WCS 的 FITS 图像天球定位及可视化系统的主体操作流程应该包括天文图像预处理、星体目标定位、星体识别、天球定位、图像格式转换和元数据转换及嵌入六部分。其中图像预处理包括：暗场校正、平场校正及滤波去噪；星体定位包括：星体目标提取、星体目标的相对星等估计及星体目标亚像素定位；星体目标识别包括：区域星表的选定和目标星匹配。这一部分可以作为程序的第一个模块进行编写。天球定位包括 WCS 算法建立坐标转换关系，可以作为程序的第二个模块。图像格式转换及显示和元数据转换及嵌入可以作为程序的第三个模块。系统总体结构如图 5-1 所示。

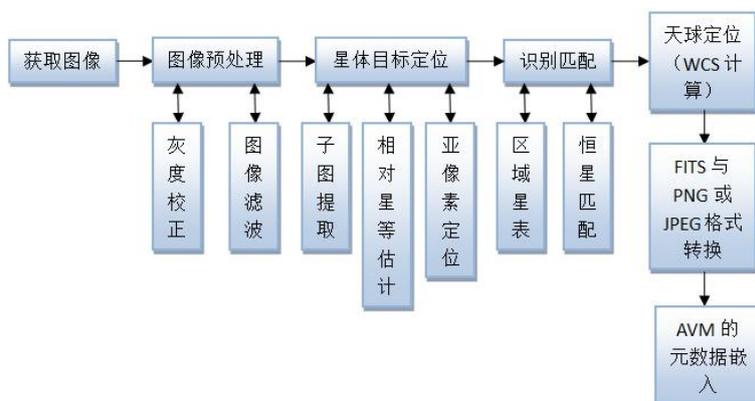


图 5-1 软件系统的总体结构

Fig.5-1 The overall structure of the software system

此外，为了实时显示 FITS 图像及标识处理结果，系统软件还包括了 FITS 图像文件的读取显示界面及辅助操作工具等模块。如图 5-2 所示为本文开发的系统软件的主界面，整个系统工作流程如图 5-3 所示。

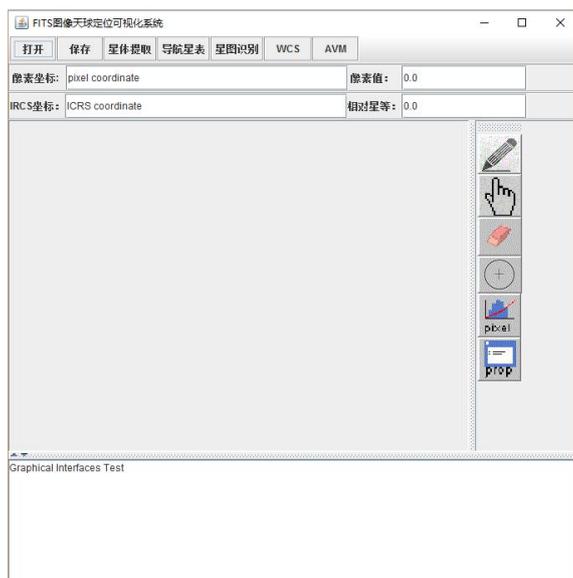


图 5-2 FITS 图像天球定位可视化软件界面

Fig.5-2 Interface FITS image celestial positioning visualization software based on WCS

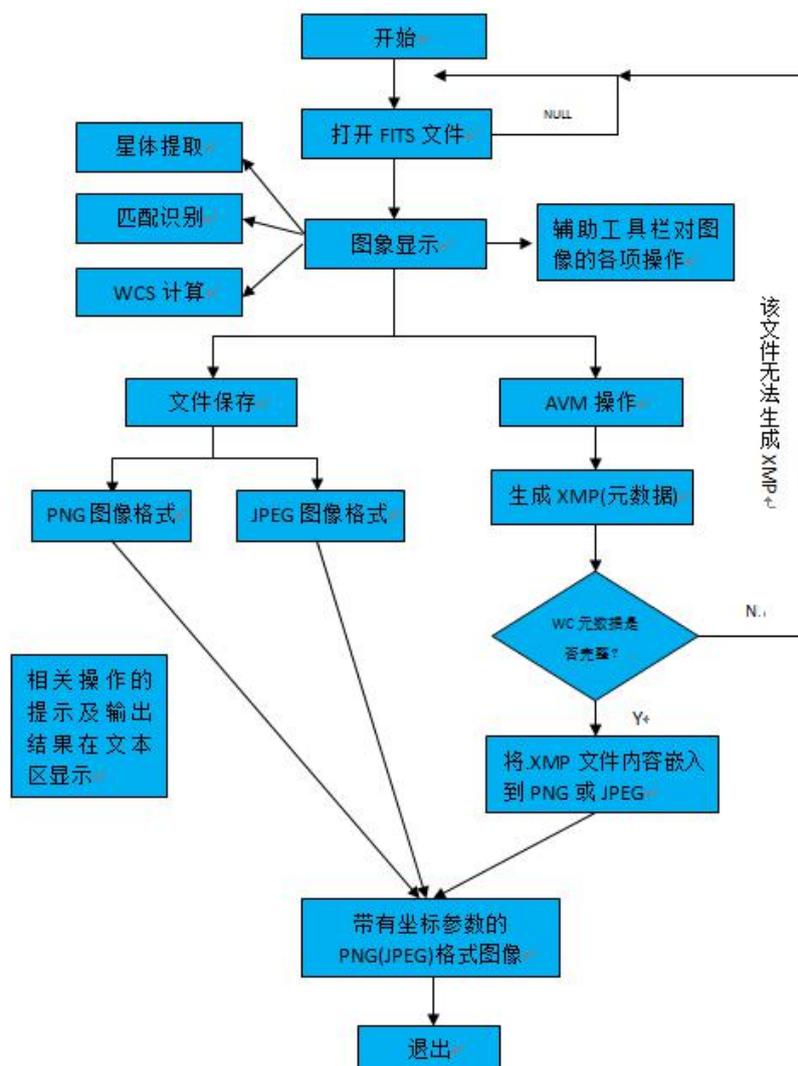


图 5-3 FITS 图像天球定位可视化软件工作流程图

Fig.5-3 FITS image celestial positioning visualization software working flow chart
各个模块的主要功能及实现:

(1) 从 FITS 图像中减去暗电流, 同时构造灰度压缩函数, 更新图像的映射显示。图像高斯滤波函数, 对 FITS 图像进行相关的掩膜运算, 完成空间域滤波, 降低平滑图像噪声。这一操作流程在打开 FITS 图像的过程中完成。

(2) 星体子图提取函数, 计算图像分割阈值, 获得子图边界并保存。亚像素定位函数, 根据图像及子图边界数据, 利用二维高斯拟合及二维修正矩法对星体进行亚像素定位。计算星体目标的相对星等, 并根据相对星等对定位星体进行排序, 结果保存在“.stars”文本中。

(3) 构造识别特征函数, 根据 CCD 参数确定图像对应天区的大概星表范围, 构建参考星表, 构造参考星对并计算星对距离, 存储为识别特征数据结构。三角形匹配函数, 对观测星进行三角形匹配。同时将结果保存在“.imstars”中。

(4) 构造 WCS 坐标转换函数, 将“.imstars”中的对应数据代入函数中并计算以键/值对形式存在的 WCS 参数, 结果保存在“.wcs”中。

(5) FITS 与 PNG 或 JPEG 的格式转换，利用 AVM 标准将 “.wcs” 中的 WCS 参数转换为元数据，并将结果保存到 “.xmp” 文本中。调用 exiv2.exe 的外部程序，将 “.xmp” 中的数据嵌入到 PNG 或 JPEG 的文件头中。

(6) 实现系统的辅助功能设计，对图像进行画线、移动、缩略、擦除等辅助标记工作。

5.3 系统操作流程及测试

5.3.1 FITS 文件的读取与显示

fits.jar 是一个机器独立的用于读写 FITS 格式数据文件的 java 开发包，提供了一个功能强大并且使用简单的 FITS 文件访问接口，能够高效快速的对 FITS 文件头及数据模块进行操作。

FITS 图像中每个像素对应的位数有 8 位、16 位、32 位、64 位、-32 位，对应的灰度范围除了 8 位能满足 Windows 操作系统的要求，其它位数的 FITS 图像都需要进行压缩灰度范围到 0~255 才能正常显示。利用 4.2 节中改进的灰度压缩算法以便显示器能够显示不同位数深度的灰度图像，同时能够调整映射关系，以显示感兴趣的图像内容。在进行灰度压缩算法后，FITS 文件中的像素会损失部分精度，但对后续操作不会造成影响。本系统除了能够加载 FITS 图像外，还可以加载 PNG 或者 JPEG 图像，提高软件的实用性。打开一副测试图像 test80maw.fits，结果如图 5-4 所示。

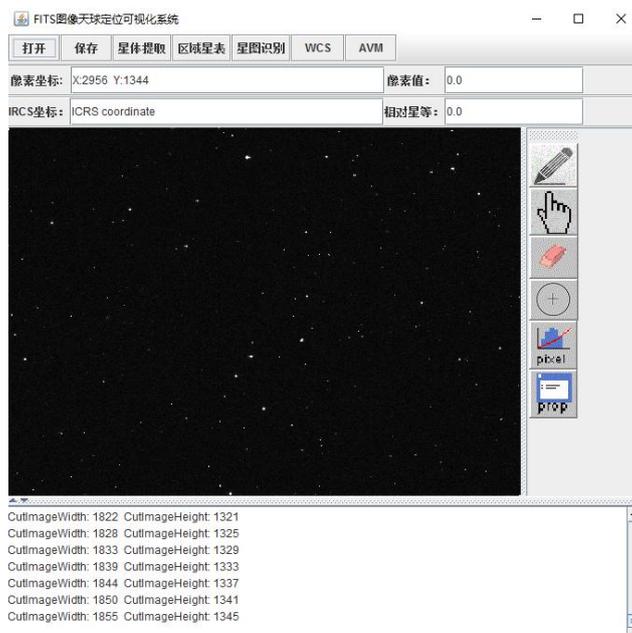


图 5-4 打开 FITS 文件后的显示界面

Fig.5-4 The display interface after opening the FITS file

5.3.2 FITS 图像星体定位

本系统将图像预处理放在了星体定位的小模块中。遍历 FITS 图像数据的每一个像素并减去对应的暗电流数据进行暗场及平场校正。本文处理的 FITS 图像的灰度都近似呈二维高斯分布，如果使用二维高斯低通滤波器对图像进行处理，由于两个高斯函数的卷积仍为高斯函数，只是星点子图的宽度和幅度发生了变化，但其灰度中心位置保持不变。因此，系统拟采用二维高斯低通滤波器，并根据 FITS 图像特征选择 3×3 标准偏差为 0.5 的高斯分布矩阵滤波器，有效抑制噪声信号，同时又能较好地保持恒星图像的灰度中心位置。 $W(i, j)$ 就是所产生的滤波器，流程如图 5-5 所示。

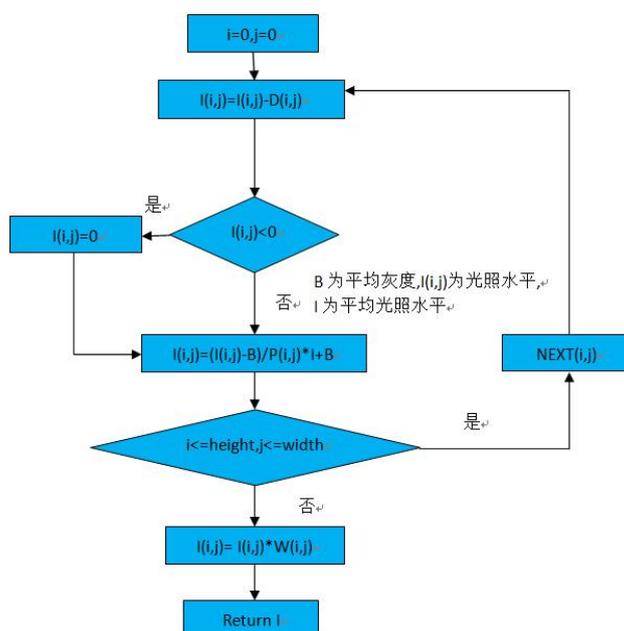


图 5-5 平场暗场校正及高斯滤波处理流程

Fig.5-5 The process flat field and dark field correction and Gaussian filtering

根据滤波后的图像数据计算阈值并提取子图，然后对每个子图进行亚像素定位。输入数据为预处理后的图像数据，保存经过排序的已提取定位的星体亚像素坐标。根据前文第三章所述相关算法，星体提取模块，系统会自行根据预处理后图像计算图像的均值和方差，进而计算用于图像分割的阈值，将图像二值化；将二值化的图像进行 4 连通分割，以提取出星体目标的子图像。再利用二维高斯拟合及二维修正矩法对图像进行亚像素定位，并与相对星等的估算在同一个循环内计算，以减少时间复杂度。星体提取及亚像素定位都放在 Findstars 类中来实现。函数形式为 Findstars(Header header, double[] imagedata, String savestarpah, boolean zap)。4 连通域标记类为 Bwlabeling，其主要函数 RegionGrow(int i, int j, int[][] input, int mode)，其中 mode 可以设置为 4 或 8 来进行相关连通域标记。针对本文测试图像，其提取星体后的亚像素坐标如图 5-6 所示。

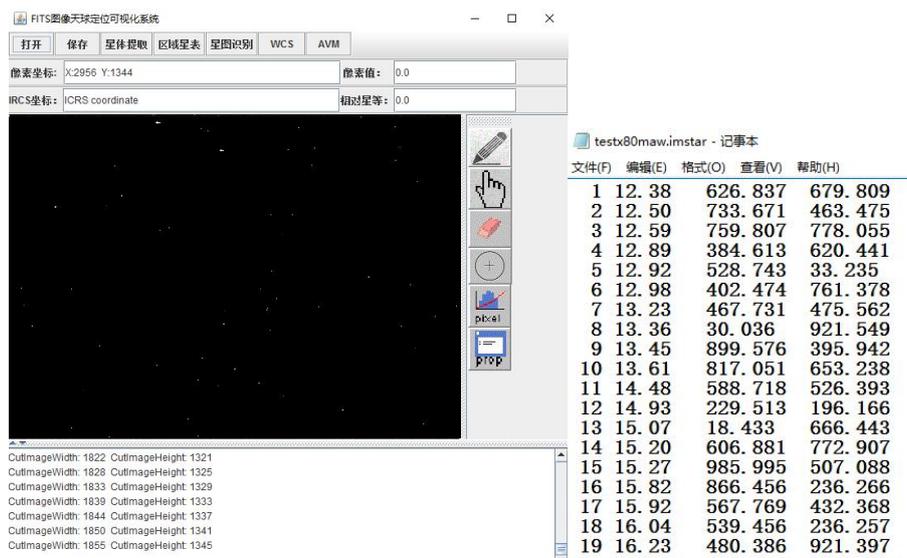


图 5-6 测试图像 test80maw.fits 的亚像素定位数据

Fig.5-6 Subpixel location data of the test image test80maw.fits

5.3.3 图像匹配识别

区域星表模块,会将依巴谷星表中与测试图像相同天区的恒星数据提取出来,结果保存到 Hipparcos.stars 中,如图 5-8 所示(图中只是显示了部分数据)。星图识别模块,构造观测三角形以及区域星表三角形,利用 3.3.2 节中设计的匹配操作流程,采用三角形边边边匹配算法对 FITS 图像进行识别匹配。该模块通过设计 MatchStars 类获取图像像素坐标与天球坐标的对应关系。本部分的主流程如图 5-7 所示。匹配结果如图 5-9、5-10 所示。

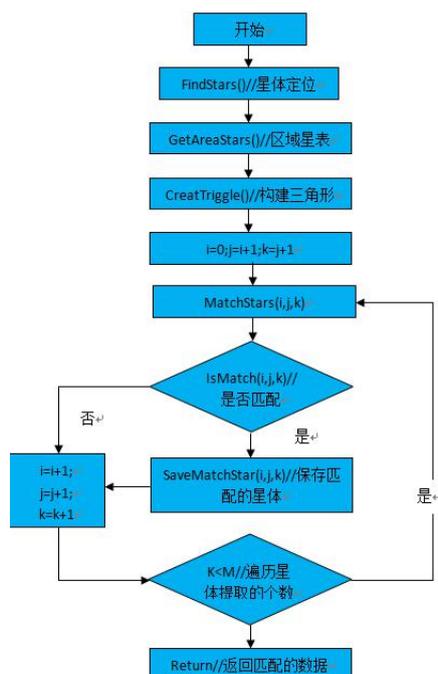


图 5-7 星体识别流程图

Fig.5-7 Stellar identification flow chart

```

Hipparcos.stars - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
244. 0389652 +31. 3283781 VizieR 244. 0389652248 3. 031
+31. 3283780979 3. 466 1319307197624757376 -0. 531 0 1. 1371e+02
3. 7927e+00 20. 385 NOT_AVAILABLE
244. 0389017 +31. 3318192 VizieR 244. 0389016562 0. 124
+31. 3318192421 0. 173 1319307197624760704 0. 524 0 3. 9690e+03
4. 4178e+00 16. 528 NOT_AVAILABLE
244. 0289575 +31. 3305956 VizieR 244. 0289574509 0. 261
+31. 3305955555 0. 346 1319307266344235520 0. 665 0 1. 3045e+03
3. 6741e+00 17. 736 NOT_AVAILABLE
244. 0316011 +31. 3403464 VizieR 244. 0316011078 4. 827
+31. 3403463615 4. 825 1319307266344242816 -0. 573 0 7. 7072e+01
2. 0319e+00 20. 808 NOT_AVAILABLE
243. 9369072 +31. 3340322 VizieR 243. 9369071695 0. 304
+31. 3340321629 0. 444 1319307816100051456 0. 510 0 5. 1766e+02
2. 7085e+00 18. 740 NOT_AVAILABLE
243. 9371443 +31. 3390072 VizieR 243. 9371443139 0. 218
+31. 3390072324 0. 296 1319307816100055424 0. 471 0 9. 4812e+02
4. 7568e+00 18. 083 NOT_AVAILABLE
243. 9830493 +31. 3328028 VizieR 243. 9830493469 0. 052
+31. 3328028431 0. 078 1319307953538569344 0. 422 0 4. 7643e+04
1. 6417e+01 13. 830 NOT_AVAILABLE
    
```

图 5-8 Hipparcos 区域星表
Fig.5-8 Hipparcos' area catalog

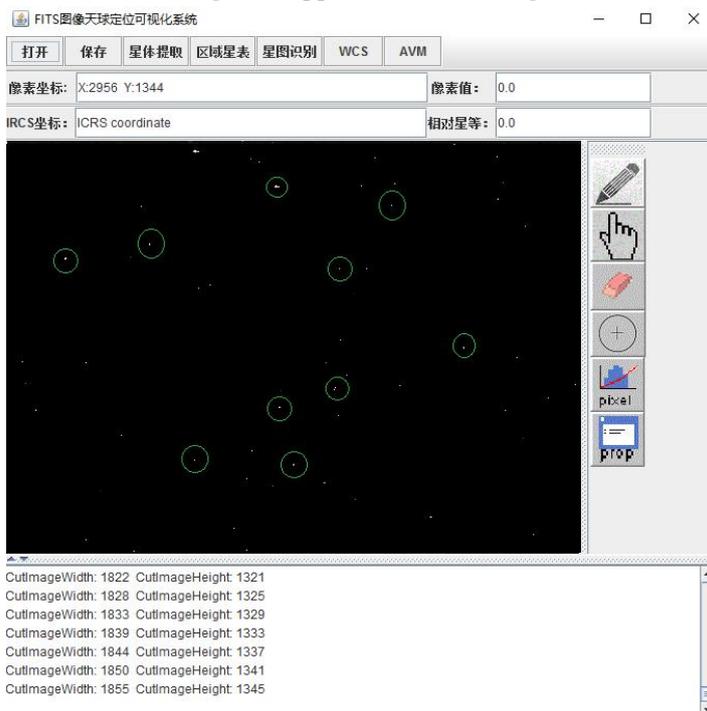


图 5-9 FITS 图像匹配效果图
Fig.5-9 The rendering of FITS image matching

```

testx80maw.match - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
1 12. 38 626. 837 679. 809 146. 8546589 27. 3450436
2 12. 50 733. 671 463. 475 146. 9398367 27. 4736060
3 12. 89 384. 613 620. 441 147. 0347748 27. 3876518
4 12. 98 402. 474 761. 378 147. 0510993 27. 4419979
5 13. 23 467. 731 475. 562 146. 2953813 27. 4118855
6 13. 45 899. 576 395. 942 146. 9054233 27. 4087986
7 13. 61 817. 051 653. 238 146. 9228622 27. 4536736
8 14. 48 588. 718 526. 393 146. 9706875 27. 4209918
9 14. 93 229. 513 196. 166 147. 0458294 27. 3818259
10 15. 20 606. 881 772. 907 147. 6284627 27. 3829032
    
```

图 5-10 FITS 图像匹配数据
Fig.5-10 Data by FITS image matching

5.3.4 WCS 求解坐标参数

WCS 模块的程序设计遵循第三章中 WCS 的计算分析过程，根据 TAN 投影

方式建立目标星体的像素坐标与天球坐标的转换函数，并将图 5-10 中获取的数据代入该函数中，利用最小二乘法解算 WCS 坐标参数。结果保存到“.wcs”文本中，该模块通过设计 CalculateWCS 类解算 WCS 坐标参数，针对本文测试图像，结果如图 5-11 所示。

```

testx80maw.wcs - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
CRPIX1 = 512.445
CRPIX2 = 512.546
RA = '10:35:45.457'
DEC = '27:35:05.43'
EQUINOX = 2000
EPOCH = 2000
RADECSYS= 'FK5'
CTYPE1 = 'RA---TAN'
CTYPE2 = 'DEC--TAN'
CRVAL1 = 146.384368732
CRVAL2 = 27.357854363
CD1_1 = -0.000256854
CD1_2 = 0.000000356
CD2_1 = 0.000000243
CD2_2 = 0.000274561

```

图 5-11 测试图像的 WCS 参数结果

Fig.5-11 WCS parameter results of the test image

5.3.5 图像格式转换

对 FITS 图像与 PNG 或 JPEG 图像格式进行转换，在 javax 的 imageio 类中有对 PNG 的读写操作，在得到图像数据后能很容易的转到 PNG 格式下。而对于 JPEG，涉及到了压缩方式，本文定义了 writeJPEG(Image img,float qual,boolean RGB,OutputStream os)函数对其进行写操作。同时加入了剪切图像的功能，本部分的设计方式主要是为了满足用户对获取图像的格式及尺寸不同的要求。图 5-12 为图像格式转换界面，图 5-13 为测试图像转换为 PNG 格式图像的结果。

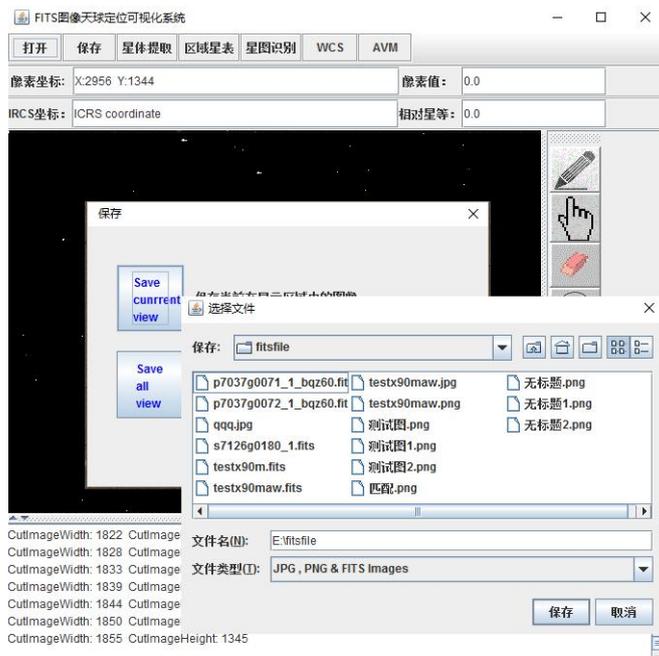


图 5-12 图像格式转换界面

Fig.5-12 Image format conversion interface



图 5-13 测试图像的 PNG 格式
Fig.5-13 PNG format of the test image

5.3.6 基于 AVM 的元数据转换及嵌入

AVM 是以 XMP (Extensible Metadata Platform) 标准为基础开发而来, 描述了扩展图像元数据模式和嵌入图像文件元数据的方法。利用该技术可以将 WCS 的相关参数嵌入到通用图像格式的文件头中, 提高了天文图像的可读性甚至是在网络中对该类图像的可检索性。因此本文将 AVM 功能模块设计了两个部分。第一是将计算得到的 FITS 图像中 WCS 坐标参数以 AVM 标准及算法转换为元数据, 并将转换后的元数据保存到 .xmp 文本中, 实现该功能的主要类为 AvmConversion, 在该类中定义了参与后续运算的 WCS 元数据标签的变量; 第二步则是通过现有的 exiv2.exe 程序, 将元数据嵌入到 PNG 或 JPEG 格式图像中。

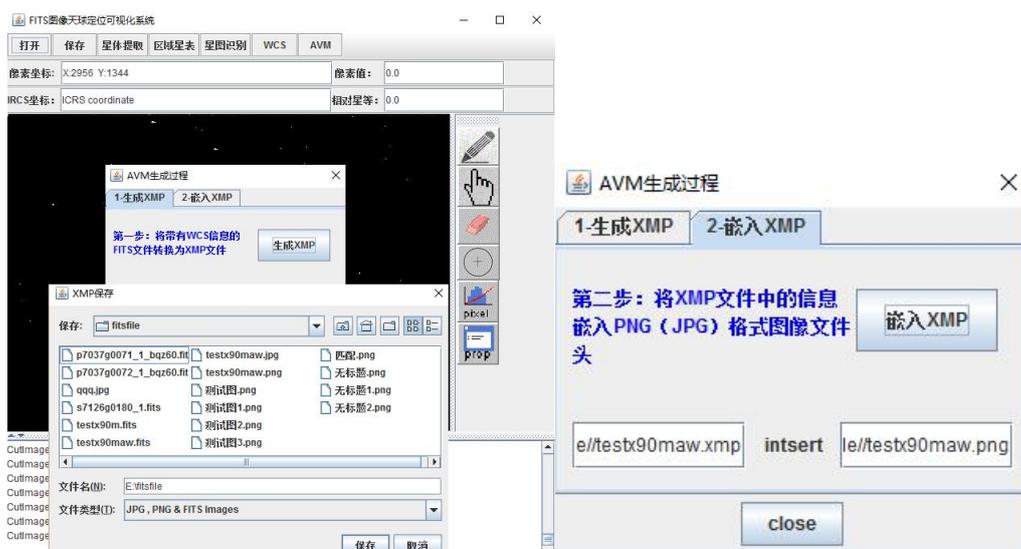


图 5-14 AVM 操作过程
Fig.5-14 The step of AVM operation

5.3.7 辅助操作工具

辅助工具的功能主要是为分析天文图像而开发,对科学研究有很好的辅助效果。包括对图像的放大缩小、画线、移动、标注、获取 FITS 头文件内容以及文本区显示。通过点击相关按钮,在图像显示区进行操作。

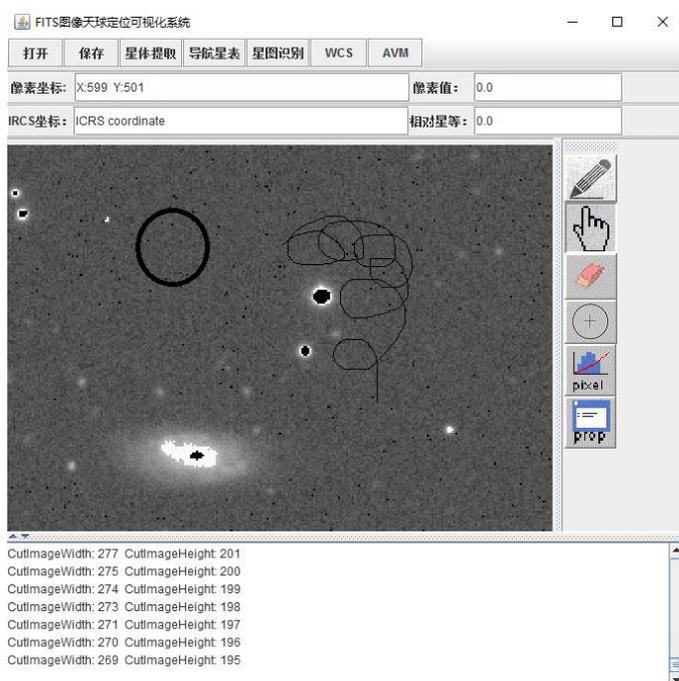


图 5-15 辅助工具对图像的画线、移动、放大、标注操作

Fig.5-15 The auxiliary tool draws the line, moves, enlarges, and labels the image

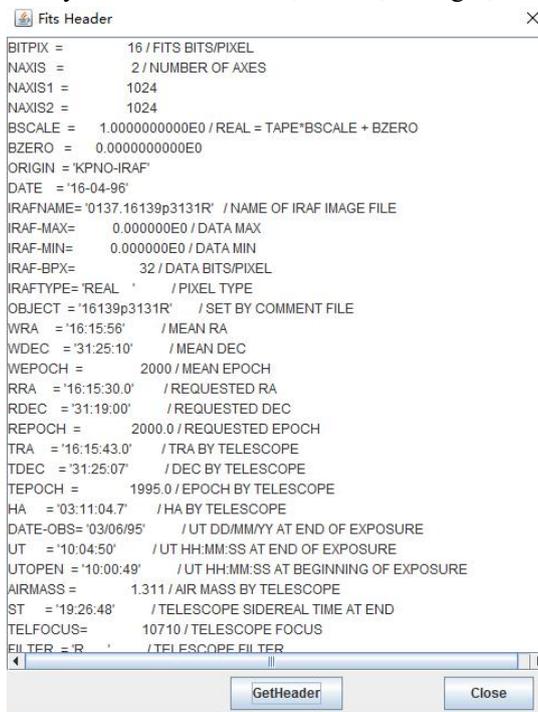


图 5-16 获取 FITS 图像的头文件

Fig.5-16 Gets the header file for the FITS image

文本显示区功能包括像素坐标显示、像素灰度值显示、IRCS 坐标显示、相对星等显示、操作过程中的一些提示及内容显示。像素坐标区显示的是鼠标放在图像显示区位置所对应的图像实际像素坐标。像素值区显示的是鼠标所在位置的像素坐标对应的灰度值,此灰度值是原始像素位数对应的实际灰度值而不是压缩的灰度值。IRCS 坐标显示区显示的是通过 WCS 算法计算得到的鼠标所在位置的像素坐标对应的天球赤道坐标。星等显示区表示鼠标所在位置的亮度。操作过程中的一些提示及内容显示区是方便操作者实时了解本操作的结果。

像素坐标:	X:517 Y:576	像素值:	1453.5
IRCS坐标:	243.95562 +31.44516	相对星等:	13.38

图 5-17 文本区显示界面

Fig.5-17 Text area display interface

通过测试,各模块功能操作正常,输出结果满足后期天文经纬度解算的需求。

5.4 本章小结

本章主要设计了基于 WCS 的 FITS 图像天球定位可视化系统的整体框架及运行流程。该系统的主体功能是对 FITS 图像进行前期预处理、星体提取、区域星表的建立、基于三角形边边边算法的图像匹配、FITS 图像的格式转换、基于 AVM 标准的元数据嵌入。同时该系统添加了一些辅助功能,来增强软件的实用性。

结 论

天球定位及可视化系统在天体测量以及天文科普方面具有重要应用。为此本文根据系统研制的总体要求,对天文图像中目标天体定位识别、图像坐标系与天球坐标系之间的转换及可视化等相关算法进行了研究,并设计实现了一种恒星定位识别及可视化系统。研究成果为天球定位及可视化系统的实现提供了技术支撑。

本文的主要研究内容及取得的成果包括:

(1) 在对天文定位及可视化系统中 FITS 图像处理需求进行分析的基础上,设计了图像预处理、恒星定位识别的实现方案。其中,通过对实际拍摄图像噪声因素的分析,针对性的实现了平场及暗场校正和图像增强算法,完成了 FITS 图像的预处理。并提出了基于噪声特征估计的背景阈值计算方法,编程实现了基于 4 连通域的星体子图提取。考虑到高定位精度的要求,采用二维高斯拟合及二维修正矩法实现了星体目标的亚像素定位,并与 SExtractor 提取的结果进行了对比分析,结果满足要求。根据系统拍摄天文图像的实际特点,为提高系统识别速度及稳定性,利用依巴谷星表建立区域星表并采用三角形边边边匹配算法,获取图像中星体目标的像素坐标及与之匹配的天球赤道坐标的对应表;

(2) 根据对应表中的数据,利用 WCS 中 TAN 投影法建立两个坐标系之间位置传递函数,从而求取函数中的 WCS 参数,确定图像中目标星体的实际天球位置;

(3) 对于图像的可视化,本文的主要研究的是 FITS 图像如何在 Windows 环境下进行显示和分析。针对 FITS 图像中像素单元的特点,设计一种基于范围的灰度压缩方法,将 FITS 与 PNG、JPEG 的图像格式进行转换。通过研究 AVM 标准及规范,实现 FITS 文件头中的坐标参数到 PNG、JPEG 中元数据的转化及嵌入,并利用 WWT 验证了试验结果;

(4) 对各研究算法进行了编程实现,并集成实现了图像处理、恒星定位识别及可视化系统,同时对集成系统进行了软件测试,验证了本文研究成果的正确性。

需要注意的是,在图像匹配阶段,对于小视场望远镜 CCD,拍摄的天文图像中恒星的数目较少,容易导致匹配的恒星数量少,以致结果的误差较大,甚至无法求得坐标参数。对于大视场望远镜所拍摄的星图,需要考虑到 WCS 算法中投影方式的选择,对于 TAN 投影方法,由于赤经的收敛性,在同列不同行的像素坐标所对应的赤经存在误差,随着视场的增大,成倍数增加。虽然实现系统经过测试取得了初步成果,达到了设计要求,但由于时间所限仍然存在许多不足,仍有许多工作需要继续深入和完善。后续的工作主要有以下几个方面:

(1) 图像预处理中采用的算法较为简单,需进一步研究更具针对性的算法,以提高系统的精度;

(2) 在软件编程中使用多线程技术,能够提高响应速度,发挥计算机性能优势。

本论文得到中国天文数据中心提供的数据资源支持。中国天文数据中心得到国家科技基础条件平台建设项目“地球系统科学数据共享平台”和“基础科学数据共享网—理化天文空间生物”的资助。

参考文献

- [1] 刘美莹.CCD 天文观测图像的星图识别和天文定位方法研究[D].中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2010.
- [2] 訾丽萍, 乔荣川.小波方法在 CCD 图像处理中的应用[J].时间频率学报.2003,6,26(1).69-73.
- [3] 周斌.CCD 星敏感器星图识别算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2007.
- [4] 李振伟.空间目标光电观测技术研究[D].中国科学院大学,2014
- [5] Greisen E.W. Calabretta M.R.Representations of world coordinates in FITS. A&A, 2000,395,1061-1075
- [6] Calabretta M.R., Greisen E.W. . Representations of celestial coordinates in FITS.
- [7] Greisen, E. W. 1986, Additional Non-linear Coordinates, AIPS Memo No. 46, National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, Virginia, May 20, available as aips46. ps. Z from <http://www.cv.nrao.edu/fits/wcs/>.
- [8] Calabretta, M. R. 1992, Spherical Map Projections, AIPS++Memo No. 107, The AIPS++ Consortium, c/o National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, Virginia, Dec 15.<http://aips2.nrao.edu/docs/memos/107.ps>.
- [9] Pence W D,Chiappetti L,Page C G,et al.Definition of the Flexible Image Transport System (FITS), version 3.0[J]. Astronomy & Astrophysics,2010,524(1):1090-1094.
- [10] 王博.数字化天顶望远镜观测图像及数据处理方法研究[D].中国科学院研究生院(国家天文台), 2014.
- [11] 邱立杰,彭青玉,张艳. FITS 图像三维显示和坐标转换[J].微计算机信息: 2011(3): 172-174.
- [12] Lars Lindberg Christensen, Robert Hurt, Adrienne Gauthier. Astronomy Visualization Metadata (AVM) Standard for the Virtual Astronomy Multimedia Project (VAMP) and other Virtual Observatories. A&A,2008.
- [13] Virtual Astronomy Multimedia Project Project Description - September 2007. <http://www.virtualastronomy.org>.
- [14] 周兴.天文定位系统中恒星定位与识别算法的研究[D].西安电子科技大学,2012
- [15] 许秀贞, 李自田, 薛利军.CCD 噪声分析及处理技术.红外与激光工[J].2004,33(4).343-357.
- [16] 季凯帆,宋谦,曹文达. CCD 图像的一维定心方法[J]. 天文研究与技术, 1996(4):69-74.
- [17] 季凯帆,王锋. CCD 图像的二维修正矩定心方法[J]. 天文学报, 1996(1):85-90.
- [18] Stone R.C.,A Comparison of Digital Centering Algorithms,AJ.,1989,Vol97,No4:1227-1237.
- [19] van Altena W.F.,Auer L.H.,Digital image centering.I,1975,Astrophysics and Space Science Library,Vol54.411.
- [20] van Altena W.F.,Auer L.H.,Mora C.L.,Vilkkii E.U.,Trigonometric parallaxes determined with the yerkes observatory 40 inch refractor.VI.Measurements made with PDS microdensitometers,AJ.,1986,Vol91,No6:1451-1455.

- [21] Lee J.-F., van Altena W.F., Theoretical studies of the effects of grain noise on photographic stellar astrometry and photometry, *AJ.*, 1983, Vol88, No11:1683-1689.
- [22] Chui, L.-T.G., Astrometric techniques with a PDS microdensitometer *AJ.*, 1977, Vol82, No10:842-848.
- [23] Stetson P.B. *Astron J.* DAOPHOT-A computer program for crowded field stellar photometry, *PASP*, 1987, Vol99, 191-222
- [24] Bijaoui A., Sky background estimation and application, *Astron. Astrophys.*, 1995, Vol4, No3:285-295.
- [25] Cudworth K.M., Rausher B.J., Astrometry and photometry in the globular cluster M2, *AJ.*, 1987, Vol93, No4:856-1000.
- [26] Herzog, A.D., Illingworth G., The structure of globular clusters. I. direct plate automated reduction techniques, *ApJS.*, 1977, 33:55-67.
- [27] Monet D.G., Dahn C.C., CCD astrometry. I. preliminary results from the kpno 4-M/CCD parallax program, *AJ.*, 1983, Vol88, No10:1489-1507.
- [28] Tython J.A., Jarvis J.F., Evolution of galaxies: automated faint object counts to 24 magnitude, *APJS.*, 1979, 230:L153-L156.
- [29] Stone R.C., Digital centering algorithms for the sun, moon, and planets, *AJ.* 1990, Vol99, No1;424-430.
- [30] Platais I., Astrometry with a PDS microdensitometer using cubic splines, *Astron. Astrophys.*, 1991, 241, 656-662.
- [31] Da Costa, G.S. Basic photometry techniques, *ASPC*, 1992, Vol.23, 90-104.
- [32] 季凯帆, 博士学位论文, 1993.
- [33] Curtis Padgett, Kenneth Kreutz-Delgado. A Grid Algorithm for Autonomous Star Identification[J]. *IEEE*. 1997, 1, 33(1). 202-212.
- [34] 原玉磊. 鱼眼相机恒星法检校技术研究[D]. 解放军信息工程大学, 2012.
- [35] 李葆华, 张迎春, 李化义, 等. 用 KMP 算法进行星敏感器星图识别的方法[J]. *光电工程*, 2004, 31(1):9-11.
- [36] 许士文, 李葆华, 张迎春, 等. 用字符匹配进行星图识别的导航库存储方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(6):819-821.
- [37] Wei Quan, Jiancheng Fang. A Star Recognition Method Based on the Adaptive Ant Colony Algorithm for Star Sensors[J]. *Sensors*. 2010, 10. 1955-1966.
- [38] 张广军, 魏新国, 江洁. 一种改进的三角形星图识别方法[J]. *航空学报*, 2006, 27(6):1150-1154.
- [39] Scholl M S. Star-field identification for autonomous attitude determination[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 1994, 18(1):61-65.
- [40] 孟靖. 大地天文测量星图定位与识别算法的研究[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [41] 冒蔚, 季凯帆, 李彬华, 杨磊, 铁琼仙. CCD 天体测量学.[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- [42] 李东明, 金文敬, 夏一飞, 等. 天体测量方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.

- [43] 赵铭.天体测量学导论[M].北京:中国科学技术出版社,2011.
- [44] 于涌,毛银盾,李岩,等.上海天文台 30 cm 旋转 CCD 漂移扫描望远镜的天体测量精度分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010(1):89-94.
- [45] Kellaway, G. P. 1946, Map Projections (Methuen & Co. Ltd., London, England.
- [46] 张丕壮,路宏年.面阵 CCD 微光像感器图像的校正[J].兵工学报.2000,11, 21(4).361-364.
- [47] 曾开华.高精度恒星孔径测光注释[D].广州:暨南大学计算机科学系,2010.
- [48] Rafael C. Gonzalez, Richard E.Woods.Digital Image Processing Second Edition[M]. New Jersey:Prentice Hall.2002.75-215.
- [49] 魏伟波,潘振宽.图像分割方法综述[J].世界科技研究与发展,2009,31(6):1074-1078
- [50] 石静.图像分割方法综述[J].科技致富向导,2012(26):69-69
- [51] 陈强.图像分割的变分模型与数值计算[D].重庆大学,2014
- [52] 陈维真,张春华,周晓东.基于局部直方图高斯拟合的星图背景性质研究[J].红外技术.2008,4,30(4).230-233.
- [53] 左文明.连通区域提取算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(1):97-98.
- [54] 王晶晶.海量灰度图像 8 连通域标记算法的设计与应用[D].河南大学, 2014.
- [55] 孙荣煜, 赵长印, 朱听雷. 高轨空间碎片图像定心算法的比较[J].中国科学物理学力学天文学, 2014, 57(6):656-664.
- [56] 严丹.天文底片数字化方法研究及其应用[D].中国科学院研究生院(国家授时中心),2016:37-78.
- [57] Strikwerda T E, Junkins J L. Star pattern recognition and spacecraft attitude determination[R]. Fort Belvoir,VA, USA: U.S. Army engineer Topographic Laboratories,1981.
- [58] Groth E J.A pattern matching algorithm for two-dimensional coordinates lists[J].Astronom. J.1986,91:1244-1248.
- [59] 马文章.球面天文学[M].北京:北京师范大学出版社,1995A&A,2002,395.1077-1122.
- [60] 汪燕芳,赵可新,卢晓猛.用 VC 实现 FITS 和 BMP 格式的转换[J].微计算机信息, 2006,04:232-233+121.
- [61] 彭青松,李有兵,在 Windows/VC ++环境下编程实现 FITS 图像的显示,天文研究与技(国家天文台台刊),2008,5: 392-397.

攻读硕士学位期间所发表的学术论文

- 1 宋文明, 苏丽颖, 樊东卫, 崔辰州. 基于 WCS 的 FITS 图像天球定位综述及通用可视化研究[1]. 天文学报 (复审 R1) ..
- 2 苏丽颖, 宋文明. FITS 图像天球定位可视化软件 V1.0, 登记号: 2017SR112583, 2017-03-08.

致 谢

衷心感谢我的导师苏丽颖副教授、国家天文台崔辰州研究员在本课题的研究过程中对我的悉心指导。攻读硕士的三年中，在苏老师的热情指导和督促下，不仅使我顺利完成了硕士论文，而且还学到了做人做事方面的知识。苏老师博学多才，治学态度严谨，为我们树立了求学和工作的榜样。值此论文完成之际，对苏老师表示衷心的感谢！

衷心感谢在我攻读硕士期间给予我巨大帮助的樊东卫老师、韩军老师、曹子皇老师、白洁老师和刘辉老师，是您们在科研和生活上给予的支持和关心使我顺利完成学业。衷心感谢所有指导和帮助过我的老师。

衷心感谢杜锋、张亚、徐鹏飞等师兄以及戴莹、张欣、毛冬冬、张双等同学给予热情帮助和支持。

衷心感谢我的父母、我的女朋友王洁，在我深造期间给予的关怀、支持与帮助。是你们的关心和期望时时陪伴着我、激励着我，使我顺利完成学业。

最后，感谢所有曾经给予我关心和帮助的老师、同学和朋友！

宋文明
2017年3月20日