

基于WCS的FITS图像天球定位综述及通用可视化研究*

宋文明^{1,2} 樊东卫² 苏丽颖^{1†} 崔辰州²

(1 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 求取FITS (Flexible Image Transport System)文件头中以键/值对形式记录的坐标参数是FITS图像在天球参考系中定位的关键, 研究坐标参数求解的一般过程具有重要意义. 通过结合观测相机相关参数、天文照相图片识别算法以及WCS (World Coordinate System)理论能够有效实现坐标参数的求解, 其中, CCD参数可确定图像对应天区在星表中的坐标范围, 从而与星表结合可构建区域星表; 天文照相图片识别完成了图像与区域星表间的匹配, 得到一定数量恒星的CCD平面坐标与其天球坐标的对应表; WCS根据球面到平面不同投影方式建立两个坐标系之间的传递函数, 选择其中一种并代入对应表中数据, 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.

FITS图像作为天文领域科学数据传输与分析的主流数据格式, 仅限于在专业天文软件中进行查看、编辑及分析, 在天文科普教育中存在局限性. 因此, 研究一种通用的图像可视化方法意义非凡. 通过对FITS与PNG或JPEG图像进行格式转换, 以AVM (Astronomy Visualization Metadata)的形式将FITS文件头中的坐标参数转换为元数据并添加到PNG或JPEG的文件头中, 能够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编程实现并通过SExtractor、虚拟天文台可视化工具WWT、图片查看器等软件进行了相关测试.

关键词 天体测量学, 天体星表, 技术: 图像处理

中图分类号: P123; **文献标识码:** A

1 引言

自从1970年美国贝尔实验室研制成功第1只电荷耦合器件以来, CCD技术便得以迅速发展. 然而对于天文观测相机拍摄得到的图像, 我们感兴趣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

2017-01-16收到原稿, 2017-05-21收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11503051、61402325), 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金项目(U1531111、U1531115、U1531246、U1731125、U1731243), 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“基础科学数据共享平台”资助

[†]sly@bjut.edu.cn

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星图识别、坐标转换、从CCD平面坐标计算出目标的天球坐标, 以完成天文定位^[1].

天文照相图片识别是将观测图像中的恒星与区域星表中的参考星进行对应匹配, 以完成视场中恒星的识别. 三角形算法是目前比较流行的天文照相图片识别算法, 其核心思想是尝试使一个由观测星构成的三角形模式唯一地与参考星表中的同构三角形匹配. 这种算法实现容易, 实时性和鲁棒性都比较好, 是目前最实用的识别算法^[2].

完成识别后需要有一种方法来描述平面坐标到球面坐标的转换关系, 以便进一步求解坐标转换参数. 在这一需求下, WCS (World Coordinate System)应运而生. WCS是由Greisen和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 (Flexible Image Transport System)图像文件头中与坐标信息相关关键字的核心方法, 在天球定位及坐标转换相关领域应用广泛.

天文学家通过望远镜获取的星图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^[3-4]. 然而FITS格式过于灵活, 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, 也可以方便地与其他图像格式相互转换^[5]. 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、曝光时间和坐标信息等重要参数, 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 (Astronomy Visualization Metadata)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. 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, 针对天文照相图片的识别匹配、WCS坐标转换、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 (Extensible Metadata Platform) 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. 软件互操作的整体流程如图1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在进行图像识别和匹配的过程中需要手动采集目标; (3) 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; (4) 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. 本文通过对天文图像的天球定位相关算法及AVM标准的研究及改进, 结合上述天文图像处理及可视化软件的分析, 通过java编写了基于WCS的FITS图像天球定位及可视化系统.

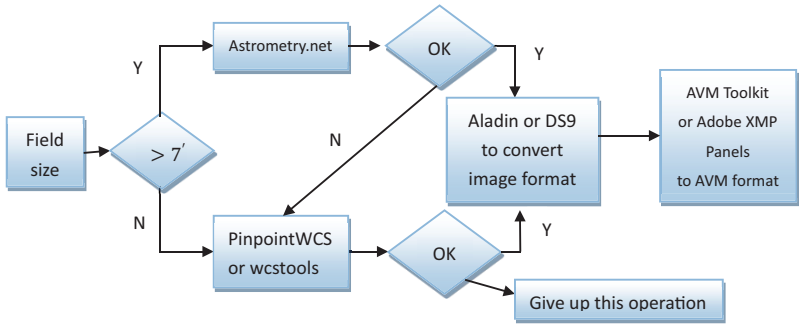


图 1 FITS图像天球定位及可视化的软件互操作流程

Fig.1 The flow chart of the software for celestial sphere positioning and visualization of FITS format image

2 天文照相图片识别匹配算法及流程

天文照相图片的识别匹配流程主要包括图像的暗场和平场校正及滤波处理、图像分割、目标星体的亚像素定位和图像识别匹配等4部分组成^[6]. 整个图像处理的流程如图2所示. 本文通过分析wcstools、Astrometry.net两个软件的图像处理模块程序代码及参考相关文献发现, 其程序主要设计思路便是遵循这4个部分来实现, 只是其各部分的实现算法各有异同.

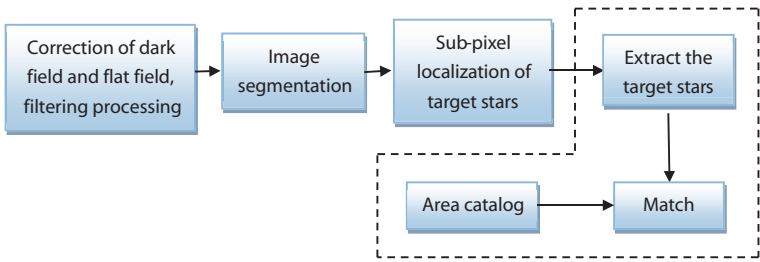


图 2 天文图片匹配识别的流程

Fig.2 The identification process for matching astronomical pictures

2.1 图像中星体的定心

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原因造成了图像中像素值较大的差异. 因而在进行其他的图像处理之前需要进行暗场和平场校正以及图像滤波处理, 提高信噪比, 消除图像中各像元响应的不一致性, 以降低对后续图像处理的影响. 此处滤波选择二维墨西哥帽小波

滤波来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.

图像分割是星体定心的第2步,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.通过分析图像灰度直方图,可以发现:图像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.选取基于灰度阈值的分割法来提取星体像素^[7]:

$$T = E \pm n \times \sigma, \quad (1)$$

式中, T 为星体分割阈值, n 为与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,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^[8]. E 是整块图像像素灰度值的均值,由每个像素灰度值的和求平均来确定 E 的值. σ 是整块图像像素灰度值的方差.任何满足 $f(x, y) \geq T$ 的点为目标点,将其灰度值标为 1,其他点则为背景点,灰度值设为 0.随后采用四连通域对二值化后的图像进行标记.不同的连通区域给予不同的标记序号,每个连通区域均被认为是一个星体目标.同时,需要舍去所占像素数目过多或过少的星体.像素数目过少可能是噪点,像素数目过多可能是曝光过度产生的或者是星云、双星等,所以两者均应该被剔除.基于这点,本文将像素点数在 36–100 之间的前景确定为有效目标.图 3 为测试图像(283, 620)坐标下的星体子图.

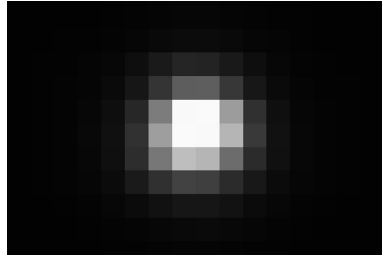


图 3 星体子图

Fig. 3 Star subgraph

图像分割之后,获得主要由星体目标构成的子图区域,即单个星体目标在观测图片中的位置坐标. CCD 摄像器件的最小分辨率为一个像素,因而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精确合理的亚像素坐标^[9].星体定心精度直接影响着天体的定位精度.

本文中星体亚像素定位采用二维修正矩法,星体中心为:

$$x_c = \frac{\sum_y \sum_x x I'(x, y)}{\sum_y \sum_x I'(x, y)}, \quad y_c = \frac{\sum_y \sum_x y I'(x, y)}{\sum_y \sum_x I'(x, y)}, \quad (2)$$

其中,

$$I'(x, y) = \begin{cases} I(x, y) - T & I(x, y) > T \\ 0 & I(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (3)$$

式中, x 、 y 为像素坐标, 门限 $T = B + 3\sigma$, B 为区域背景像素值均值, σ 为区域背景标准偏差, $I(x, y)$ 表示 x 、 y 坐标处的灰度值. 区域的确定则是通过构造一个 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的矩形模板, 如图4所示. 模板的大小由 n (正整数) 决定, 根据本文提取的星体像素数可以得到 n 取3-5. 矩形外接圆半径 r 为 $\sqrt{2}(n+1/2)$, 以内环半径为 r , 外环半径为 $2r$ 的圆环作为计算 B 及 σ 的背景区域.

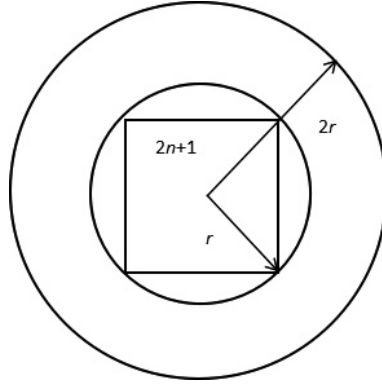


图4 $(2n+1) \times (2n+1)$ 像素模板示意

Fig. 4 A template with $(2n+1) \times (2n+1)$ pixel

进行图像识别时, 通常会选择亮度较大的目标作为待测星, 因此可以利用基于灰度的相对星等对提取星体的亮度进行估算. 通过图像预处理后得到了基于相对星等排序的目标星体亚像素坐标数据, 该结果保存在.stars文本中. 如图5所示, 左图是一副 1024×1024 pixel 的16位测试图像, 右图为从左图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1, 可以发现: 在 x 方向, 二者之间的偏差在0.1 pixel以下; 在 y 方向, 偏差在0.2 pixel以下, 满足本文需求.

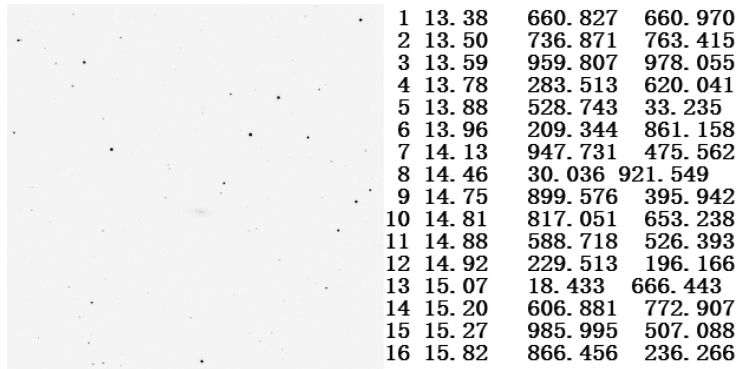


图5 星体亚像素提取. 左图为测试图像; 右图为提取的亚像素坐标数据, 右图中第2列是恒星的相对星等, 第3、4列是 x 、 y 的亚像素坐标.

Fig. 5 Stars subpixel extraction. The left panel is a test image and the right panel is the subpixel coordinates data by extracting; The second column on the right panel is the relative magnitude of the stars, and the third and fourth columns are the x and y subpixel coordinates, respectively.

表 1 亚像素坐标对比表
Table 1 Comparison of the subpixel coordinates

Number	Two-dimensional modified moment centering algorithm		SExtractor	
	x/pixel	y/pixel	x/pixel	y/pixel
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

2.2 天文照相图片识别匹配

依据CCD观测相机视轴指向及视场大小从参考星表Hipparcos中得到的恒星位置为星表位置, 天文照相图片上测量的星象位置为待测位置. 图片中待测星与星表中参考星的匹配是通过图像中的特征信息将星表中的星象和照相图片上的星象进行匹配. 匹配成功后就可以建立星表位置和待测位置之间的关系, 如图6所示.

常用的识别匹配方法有: 三角形匹配算法、圆形区域法、栅格算法, 其中, 三角形匹配简单易于实现, 是目前广泛使用的方法. 三角形匹配方法中, 由星表位置构建的三角形为星表三角形, 观测图像中构建的三角形为观测三角形. 为了减小三角形的存储空间, 本文只选取较亮的恒星. 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^[10].

Hipparcos星表中存储的是恒星在标准历元(J2000)的平赤道位置, 而CCD器件所拍摄的是恒星的视位置, 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.

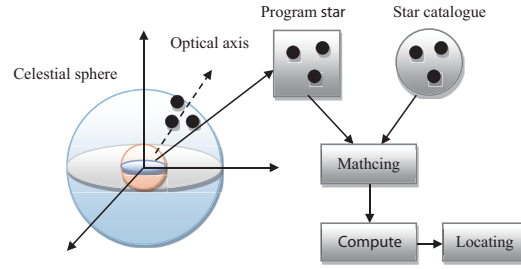


图 6 天文照相图片识别原理图

Fig. 6 The schematic diagram of astronomical photographic image recognition

本文借鉴wcstools中的immacth模块及相关文献进行像素坐标与天球坐标的对应映射, 其中图像识别利用三角形算法边边边匹配, 如图7所示, 若观测三角形的3条边和星表三角形的3条边在一定误差范围下相等, 则认为匹配成功^[11]. 图中的边是指星对角距. 设 l^{12} 、 l^{13} 和 l^{23} 为观测三角形的3条边, $l(i, j)$ 、 $l(i, k)$ 和 $l(j, k)$ 为星表三角形中的3条边.

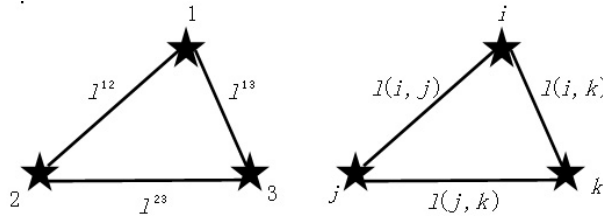


图 7 观测三角形(左)和星表三角形(右)的匹配原理图

Fig. 7 The matching principle diagram of observed (left) and star (right) triangles

由余弦定理求得观测三角形每颗星的星对角距为:

$$\begin{cases} l^{12} = \arccos\left(\frac{R_{1O}^2 + R_{2O}^2 - R_{12}^2}{2R_{1O}R_{2O}}\right) \\ l^{13} = \arccos\left(\frac{R_{1O}^2 + R_{3O}^2 - R_{13}^2}{2R_{1O}R_{3O}}\right) \\ l^{23} = \arccos\left(\frac{R_{2O}^2 + R_{3O}^2 - R_{23}^2}{2R_{2O}R_{3O}}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

R_{1O} 、 R_{2O} 、 R_{3O} 分别为每颗星到天球球心的距离, 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} 分别为星表中不在同一直线上的任意3颗星的赤道坐标.

星表三角形每颗星的星对角距为:

$$\begin{cases} l(i, j) = \arccos[\cos \delta_i \cos \delta_j \cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin \delta_i \sin \delta_j] \\ l(i, k) = \arccos[\cos \delta_i \cos \delta_k \cos(\alpha_i - \alpha_k) + \sin \delta_i \sin \delta_k] \\ l(j, k) = \arccos[\cos \delta_j \cos \delta_k \cos(\alpha_j - \alpha_k) + \sin \delta_j \sin \delta_k] \end{cases}, \quad (5)$$

(α_i, δ_i) 、 (α_j, δ_j) 和 (α_k, δ_k) 分别为星表中不在同一直线上的任意3颗星的赤道坐标.

利用三角形边边匹配算法对测试图像进行匹配, 结果如图8所示. 右图的匹配数据保存到.match的文本中.

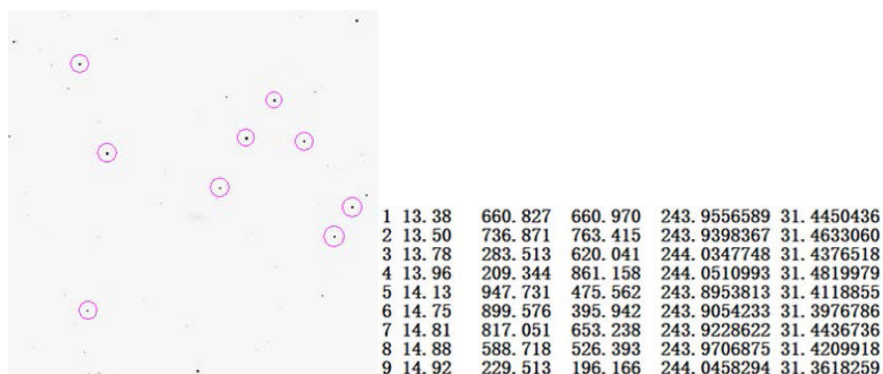


图 8 三角形识别匹配到的天球对应坐标. 左、右图分别为图像匹配到的目标星体和对应的数据. 右图中第5、6列分别为赤经和赤纬.

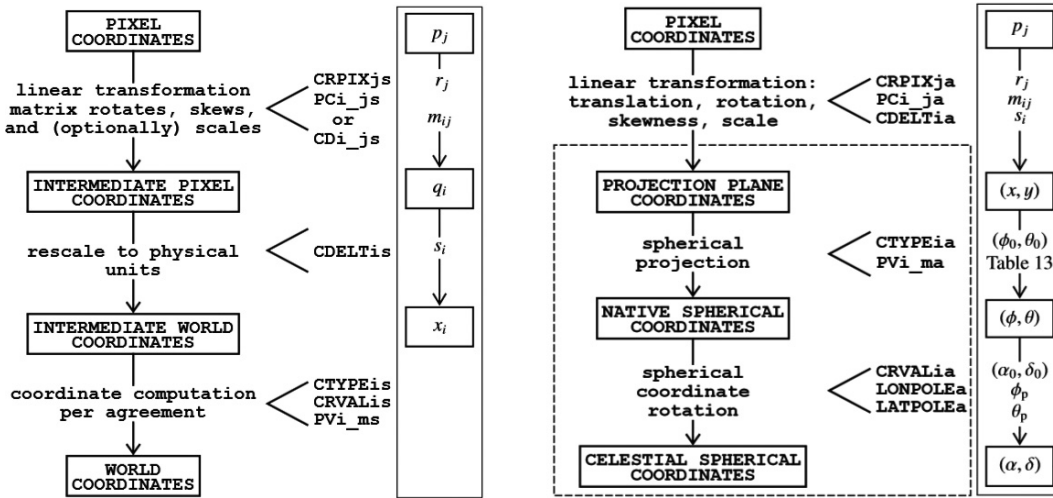
Fig. 8 Matching to the celestial coordinates by triangle recognition. The left and right panels are the image matches to the target objects (left) and the corresponding data (right), respectively. The columns 5, 6 are the right ascension and declination, respectively.

3 基于WCS的天球定位与坐标参数计算

天球定位的主要任务就是建立CCD平面像素坐标 (x, y) 和对应的天球坐标 (α, δ) 之间的坐标转换函数. 本文利用WCS中的TAN (Gnomonic)投影来建立这一函数, 将照相图片识别匹配后获得的几组对应数据代入其中, 求取WCS参数. 运用最小二乘法解出最优参数值, 并将其添加到FITS文件头中, 为后续的元数据转换提供数据.

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 $_j$ (第 j 轴参考点像素坐标)、CRVAL $_i$ (第 i 轴参考点天球坐标)、CTYPE $_i$ (第 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).

WCS坐标系的建立主要分两个部分: (1)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; (2)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即本地球面坐标系(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9所示, 图中, i 为世界坐标的索引变量, j 为像素坐标的索引变量; p_j 为像素坐标; r_j 为参考点像素坐标, 在FITS图像文件头中以CRPIX $_j$ 表示; m_{ij} 是一个 $i \times j$ ($i = j$)的线性转换矩阵, 以PC $_{i-j}$ 表示; s_i 为坐标系数, 以CDELT $_i$ 表示; x_i 是具有过渡性的量测坐标; (x, y) 为投影平面坐标; (ϕ, θ) 为本地天球(native celestial)坐标系下的赤经赤纬; (α, δ) 为实际天球坐标系下的赤经赤纬; (ϕ_0, θ_0) 为参考点在本地天球坐标系的赤经赤纬, 分别以PV $_{i-1}$, PV $_{i-2}$ 表示; (α_0, δ_0) 为参考点在实际天球坐标系的赤经赤纬, 以CRVAL $_i$ 表示; (ϕ_p, θ_p) 为天球极点在本地天球坐标系的赤经赤纬, 以LONPOLE, LATPOLE表示; (α_p, δ_p) 为本地天球极点在本地天球坐标系的赤经赤纬.

图9 WCS坐标转换流程^[12-13]Fig. 9 The flow chart of coordinate transformation by WCS^[12-13]

3.1 像素平面坐标系与世界坐标系(量测坐标系)的转换

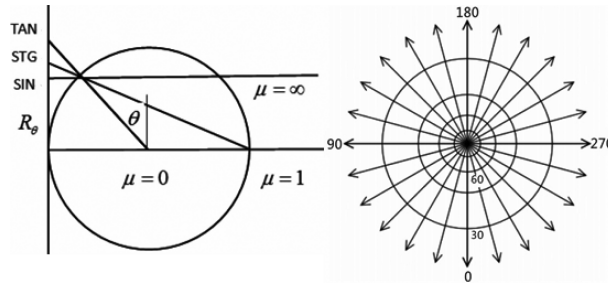
由于图像坐标系只表示像素位于数字图像的列数和行数,并没有用物理单位表示出该像素在图像中的物理位置,因而需要再建立以物理单位(弧度)表示的CCD成像平面量测坐标系,其坐标平面与CCD主光轴垂直,并与半径为 f (焦距)的球面相切,其切点为原点,横轴指向东,纵轴指向北,原点定义在相机光轴和成像平面的交点,该点一般位于图像中心处^[14-15].转换公式为:

$$x_i = \sum_{j=1}^N (s_i m_{ij})(p_j - r_j), \quad (6)$$

本文处理的是二维图像,式中的 N 为2, $s_i m_{ij}$ 可用 CDi_j 表示(CDi_j 不能与 PCi_j 同时存在FITS文件头中).

3.2 世界坐标系与天球坐标系的转换

球面到平面的图像映射关键在于投影方式, 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),其中方位投影又包括球心投影(TAN)、正射投影(SIN)等,圆柱投影包括圆柱透视投影(CYP)、等积投影(CEA)等.根据CCD视轴是否过球心及视轴与拍摄球面的角度的不同选择投影方法,如CCD视轴过球心且垂直球面可选TAN,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,若卫星相机视轴与球面存在夹角可选用AZP投影.选定投影方式后将其赋值给CTYPEi后3个字节.本文用的是TAN投影,如图10所示.

图 10 TAN投影示意图(左)及投影平面效果图(右) ($u = 0$)Fig. 10 The schematic diagram of TAN projection (left) and renderings of projection plane (right) ($u = 0$)

世界坐标系与本地球面坐标系在此投影方式下的公式为:

$$\begin{cases} \phi = \arctan(-y/x) \\ R_\theta = 180^\circ / \cot \theta \\ \theta = \tan^{-1} [180^\circ / (\pi R_\theta)] \end{cases} \quad (7)$$

选定投影方式后需要选取天球坐标系. 天球坐标系包括地平、时角、赤道和黄道坐标系^[16], 本文使用天球赤道坐标系, 将其赋值CTYPE*i*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. 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天空坐标系中的经度和纬度(α_p, δ_p) (该参数确定CRVAL*i*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LONPOLE*a* ($= \text{PVi.3a}$). 如果 $\delta_0 \geq \theta_0$, LONPOLE*a*的缺省值为0, 否则为 180° . 因此对于方位投影LONPOLE*a*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($\alpha_p + 90^\circ, 90^\circ - \delta_p, \varphi_p + 90^\circ$), 可得本地球面坐标系与天球坐标系转换公式:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_p + \arg[\sin \theta \cos \delta_p - \cos \theta \sin \delta_p \cos(\phi - \phi_p), -\cos \theta \sin(\phi - \phi_p)] \\ \delta = \sin^{-1}[\sin \theta \sin \delta_p + \cos \theta \cos \delta_p \cos(\phi - \phi_p)] \end{cases}, \quad (8)$$

结合(6)–(8)式, 将其中 $s_i m_{ij}$ 用CD*i-j*表示. 未知参数包括CD1.1、CD1.2、CD2.1、CD2.2、CRPIX1、CRPIX2、CRVAL1、CRVAL2, 将图像匹配到的9组数据代入函数, 其中, (p_1, p_2)对应像素平面坐标(x, y), (α, δ)对应同组数据的赤经赤纬. 每组数据对应2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, 组成误差方程式, 进行最小二乘平差求解, 即可求得8个未知参数. 将其保存到.wcs的文本中, 如图11左图所示. 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wcstools的imwcs模块、Astrometry.net等, 图11右图为Astrometry.net求取WCS的结果.

testb90maw.wcs - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

CRPIX1	=	514.547
CRPIX2	=	512.293
RA	=	'16:15:56.745'
DEC	=	'31:25:06.83'
EQUINOX	=	2000
EPOCH	=	2000
RADECSYS	=	'ICRS'
CTYPE1	=	'RA---TAN'
CTYPE2	=	'DEC---TAN'
CRVAL1	=	243.986435732
CRVAL2	=	31.418563763
CD1_1	=	-0.000178991
CD1_2	=	0.000000681
CD2_1	=	0.000000289
CD2_2	=	0.000178771

FITS header

CRPIX1	=	514.5489
CRPIX2	=	512.2928
RA	=	'16:15:56.745'
DEC	=	'31:25:06.83'
EQUINOX	=	2000
EPOCH	=	2000
RADECSYS	=	'ICRS'
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
IMTCS	=	'2.6, 9 March 1999, Doug Mink, SAO'

Search

Clear

Back

图 11 本文(左)与Astrometry.net (右)求取的WCS坐标参数结果对比

Fig. 11 Comparison parameters of WCS coordinates by this article (left) and Astrometry.net (right)

4 FITS图像格式转换及AVM转换

FITS意为灵活的图像传输系统, 主要应用于存储和传输天文图像的格式. 而这种格式对大众来说, 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作科普宣传, 一般是不能把这些图像以FITS格式传递出去的. 这就需要进行图像格式转换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, 对于FITS中的重要观测数据、WCS坐标参数并没有保留. 因此需要将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.

4.1 FITS格式与PNG (JPEG)格式的转换

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^[17]. 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. 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 分别为图像的高、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, 能够较好地保留信息并提高运行速度. 然后, 对FITS格式进行转换, 在javax.imageio类中有对PNG的读写操作, 在得到图像数据后很容易转到PNG格式下. 而对于JPEG格式, 涉及压缩方式, 本文定义了writeJPEG函数(Image img, float qual, boolean RGB, OutputStream os)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12所示.

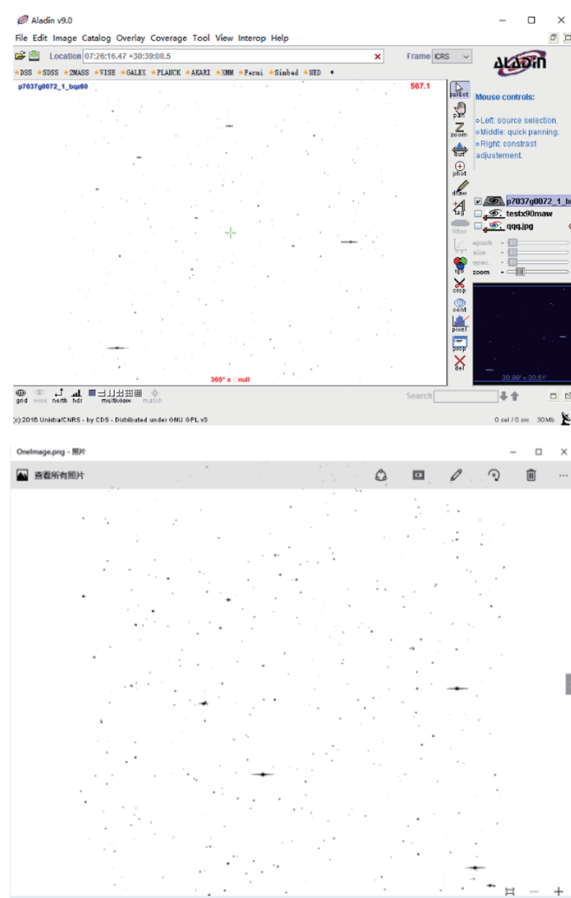


图 12 FITS格式(上)与PNG格式(下)图像的不同查看方式

Fig. 12 Different viewing methods of FITS (top panel) and PNG (bottom panel) format images

4.2 基于AVM的WCS参数元数据转换

AVM标准是VAMP项目的底层构架. 它是以XMP标准为基础开发而来的, 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^[18]. 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文本块的集合.

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, 我们得到一幅蟹状星云图像, 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标准给我们建立了很好的机制. 鉴于本文的研究方向, 此处只考虑坐标信息的标签建立.

对于天文照相图片的定位可视化, AVM建立了一整套的WCS标签以描述图像的位置、方向、尺寸等信息. 如Spatial.CoordsystemProjection用来描述投影方式, 由CTYPE_{*i*}的后3个字节给定; Spatial.Rotation用来描述图像在天区的转角, 由CROTA_{*i*}

给定; Spatial.ReferenceDimension描述图像尺寸, 由NAXIS_{*i*}给定; Spatial.ReferencePixel用来描述参考像素点的坐标, 由CRPIX_{*i*}给定; Spatial.ReferenceValue用来描述参考点天球坐标, 由CRVAL_{*i*}给定; Spatial.Scale用来描述象元物理尺寸, 由CDELT_{*i*}给定; 还包括其他一些基本坐标信息等. 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13所示testx90maw.xmp), 再调用exiv2.exe程序将元数据嵌入到PNG (JPEG)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 13 WCS元数据

Fig. 13 WCS metadata

需要注意的是: CROTA_{*i*}在前文中并没有参与计算, 而是利用了CD_{*i*}_{*j*}, AVM标准中却没有描述CD_{*i*}_{*j*}的标签, 可以利用如下(9)式进行二者之间的转换:

$$\begin{cases} \text{CROTA1} = (180^\circ/\pi) \arctan[-1(\text{CD1.1} \times \text{CDELT1})/(\text{CD1.2} \times \text{CDELT2})] \\ \text{CROTA2} = (180^\circ/\pi) \arctan[-1(\text{CD2.1} \times \text{CDELT2})/(\text{CD2.2} \times \text{CDELT1})] \\ \text{CROTA} = (\text{CROTA1} + \text{CROTA2})/2 \end{cases}, \quad (9)$$

5 基于WWT的可视化测试

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", 需要

在Astrometry.net进行WCS参数求解,如图14所示. 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15所示.

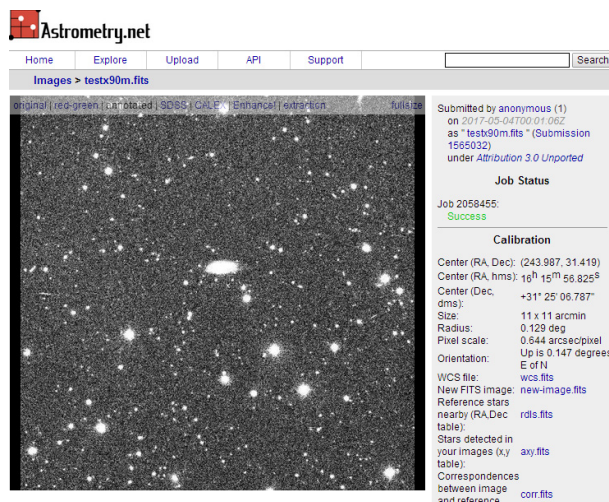


图 14 Astrometry.net求解WCS参数

Fig. 14 Solution of WCS parameters by Astrometry.net

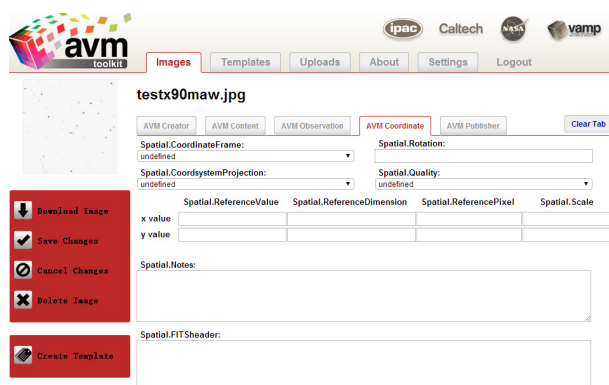


图 15 AVM Toolkit添加WCS参数

Fig. 15 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16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. 目前已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,有美国宇航局(NASA)、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.

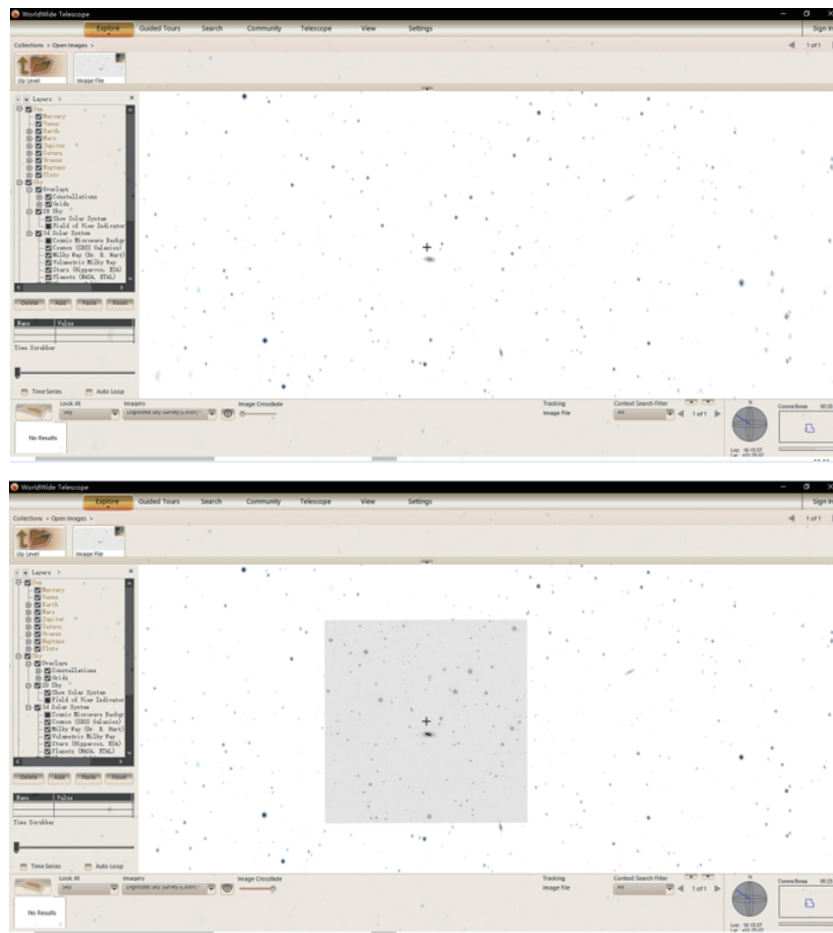


图 16 带有WCS元数据的PNG图像在WWT中的可视化测试. 上图为在WWT中与测试图片对应天区的可视化数据, 下图为带有WCS信息的PNG图像在WWT中的自主定位

Fig. 16 The visualization test of PNG image with WCS metadata in WWT. The upper panel is the test picture corresponding to the area of visual data, and the lower panel is the autonomous positioning of PNG image with WCS information.

6 总结

天文观测相机作为天文图像的重要获取途径, 正在被各国尤其是钟情于太空的大国竞相研制, 与之配套的空间目标识别定位系统的开发工作也被同期开展. 而天文图像作为研究和科普的重要对象, 相关的可视化软件近年来也层出不穷. 图像的目标识别、目标定位及可视化成为关键. 为此本文对天文照相图片的识别、天球定位和可视化技术进行了研究.

图像识别匹配是目标天球定位的关键步骤, 可以得到一定数量恒星的CCD平面坐标与其天球坐标的对应表, 根据这些恒星的CCD平面坐标, 以及对应的天球坐标, 利用WCS坐标转换原理就可以建立两个坐标系之间的转换函数, 从而确定目标星体的天球位置. 通过研究常用的图像识别技术, 结合天文观测相机的特点, 选择了三角形识别

算法,从提取观测星、选择参考星表和三角形识别算法的实现3个方面进行了阐述,并进行了相关的实验验证.需要注意的是:在图像匹配阶段,对于小视场的观测相机,拍摄的图片中恒星的数量较少,容易导致匹配的恒星数量少,以致结果误差较大,甚至无法求得坐标参数.对于大视场望远镜所拍摄的图片,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,成倍增加.

对于图像的可视化,本文的主要研究是FITS图像如何在Windows环境下进行显示和分析.主要方法是将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,通过java设计了基于WCS的FITS图像天球定位及可视化系统.

致谢 本论文得到中国虚拟天文台和中国天文数据中心提供的数据资源和技术支持.

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. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2010
- [2] 周斌. CCD星敏传感器星图识别算法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- [3] Pence W D, Chiappetti L, Page C G, et al. A&A, 2010, 524: A42
- [4] 王博. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理方法研究. 北京: 中国科学院大学, 2014
- [5] 邱立杰, 彭青玉, 张艳. 微计算机信息, 2011, 27: 172
- [6] 周兴. 天文定位系统中恒星定位与识别算法的研究. 西安: 西安电子科技大学, 2012
- [7] 魏伟波, 潘振宽. 世界科技研究与发展, 2009, 31: 1074
- [8] 石静. 科技致富向导, 2012, 26: 69
- [9] 李季, 唐建博. 光学与光电术, 2007, 5: 75
- [10] 严丹. 天文底片数字化方法研究及其应用. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2016
- [11] 李振伟. 空间目标光电观测技术研究. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014
- [12] Greisen E W, Calabretta M R. A&A, 2002, 395: 1061
- [13] Calabretta M R, Greisen E W. A&A, 2002, 395: 1077
- [14] 刘美莹, 王虎, 汶德胜, 等. 光子学报, 2014, 43: 1112005
- [15] 郭敏, 张红英. 测绘技术装备, 2005, 7: 28
- [16] 马文章. 球面天文学. 北京: 北京师范大学出版社, 1995
- [17] 汪燕芳, 赵可新, 卢晓猛. 微计算机信息, 2006, 4: 232
- [18] Christensen L L, Hurt R, Gauthier A. Astronomy Visualization Metadata (AVM) Standard for the Virtual Astronomy Multimedia Project (VAMP) and Other Virtual Observatories. IVOA DRAFT Note, 2008

Review on the Celestial Sphere Positioning of FITS Format Image Based on WCS and Research on General Visualization

SONG Wen-ming^{1,2} FAN Dong-wei² SU Li-ying¹ CUI Chen-zhou²

(1 College of Mechanical Engineering and Application Electronic Technology, Beijing University of
Technology, Beijing 100124)

(2 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

ABSTRACT Calculating the coordinate parameters recorded in the form of key/value pairs in FITS (Flexible Image Transport System) header is the key to determine FITS images' position in the celestial system. As a result, it has great significance in researching the general process of calculating the coordinate parameters. By combining CCD related parameters of astronomical telescope (such as field, focal length, and celestial coordinates in optical axis, etc.), astronomical images recognition algorithm, and WCS (World Coordinate System) theory, the parameters can be calculated effectively. CCD parameters determine the scope of star catalogue, so that they can be used to build a reference star catalogue by the corresponding celestial region of astronomical images; Star pattern recognition completes the matching between the astronomical image and reference star catalogue, and obtains a table with a certain number of stars between CCD plane coordinates and their celestial coordinates for comparison; According to different projection of the sphere to the plane, WCS can build different transfer functions between these two coordinates, and the astronomical position of image pixels can be determined by the table's data we have worked before.

FITS images are used to carry out scientific data transmission and analyze as a kind of mainstream data format, but only to be viewed, edited, and analyzed in the professional astronomy software. It decides the limitation of popular science education in astronomy. The realization of 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 in the non-astronomical software platform. The overall design flow is realized through the java program and tested by SExtractor, WorldWide Telescope, picture viewer, and other software.

Key words astrometry, celestial ephemeris, techniques: image processing