



# 太阳局部高分辨观测像的日球坐标自动标定

季凯帆<sup>1\*</sup>, 刘辉<sup>1,2</sup>, 金振宇<sup>1</sup>, 尚振宏<sup>2</sup>, 强振平<sup>3</sup>

1. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216;

2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650504;

3. 西南林业大学大数据与智能工程学院, 昆明 650224

\* 联系人, E-mail: jkf@ynao.ac.cn

2019-01-29 收稿, 2019-03-04 修回, 2019-03-19 接受, 2019-05-09 网络版发表

国家自然科学基金(11773072, 11573012, 11873027, 11833010, 11603016, U1831210)资助

**摘要** 观测图像的日球坐标标定通常是处理太阳局部高分辨观测像的第一个步骤, 但这也一直是很多太阳物理学家面临的困难. 本文应用尺度不变特征变换来提取特征匹配点, 提出了一种将局部高分辨光球和色球图像与空间/地面全日面像自动匹配以确定其视场在日球坐标系位置的方法. 同时还总结了一套有针对性的图像预处理方案和流程, 用于提高特征点检测的准确度和增加匹配点对数量, 从而成功地实现了新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)的氧化钛(titanium dioxide, TiO)波段与太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory, SDO)日震磁像仪(helioseismic and magnetic imager, HMI)连续谱、H $\alpha$ 波段与全球日震网(Global Oscillation Network Group, GONG)或者太阳动力学天文台/大气成像仪(atmospheric imaging assembly, AIA)304 Å波段的图像配准. 最终结果用SDO标准关键字记录在标定后的普适图像传输系统(flexible image transport system, FITS)文件头中, 以便使用通用的太阳软件包来进行各种后处理. 这一工作实现了高分辨观测像的标准化日球坐标标定, 为太阳物理学家更好地使用高分辨观测数据提供了极大的便利, 从而提高了数据利用率和科学产出.

**关键词** 太阳高分辨图像, 全日面观测, 日球坐标系, 视场定标

近10年来, 太阳物理的研究越来越需要高空间分辨率和高时间分辨率的图像. 多架米级以上口径的地基太阳望远镜相继投入使用, 太阳高分辨成像观测是所有这些望远镜的重点内容, 并与空间太阳观测成为互补. 作为国内最大的太阳望远镜, 一米新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)<sup>[1]</sup>已经成为世界几大太阳高分辨观测系统之一, 达到世界先进水平. 高分辨太阳观测图像展示的都是太阳的局部特征, 如何精确确定观测视场的日球空间坐标一直是太阳物理学家面临的难题. 只有进行高精度的视场标定, 才能将地基/空间不同望远镜的全日面或者局部观测数据衔接起来, 从而通过多设备、多波段数据的综合分析得

到立体的太阳物理图像, 这几乎是研究多波段观测数据的第一步. 但由于目前硬件技术的限制, 无论是NVST还是目前世界上最大的美国1.6米Goode太阳望远镜(Goode Solar Telescope, GST)<sup>[2]</sup>的观测图像都没能给出精确的视场坐标. NVST只是根据太阳活动区编号提供了一个非常粗略的位置, 如S08E18这种形式. 即便是同一个望远镜, 同一时刻不同波段的观测也由于光路和电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)的不同, 视场不能保持严格一致. 王瑞等人<sup>[3]</sup>为解决NVST不同波段间的视场对齐问题, 采用一个针孔视场光阑作为过渡. 但对于没有使用这个光阑的历史数据, 这一方法不能采用, 而且这一方法也无法得到标准的日球

**引用格式:** 季凯帆, 刘辉, 金振宇, 等. 太阳局部高分辨观测像的日球坐标自动标定. 科学通报, 2019, 64: 1738–1746

Ji K F, Liu H, Jin Z Y, et al. An automatic approach of mapping the solar high-resolution image to Helioprojective-Cartesian coordinates system (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1738–1746, doi: 10.1360/N972019-00092

坐标。

局部像的日球坐标位置获得一般有两种方案：一种是依赖望远镜的指向和导行精度得到观测图像在日球坐标系中的绝对坐标。这要求望远镜的指向和跟踪系统有非常高的精度和系统稳定性。对于大型地基望远镜，达到角秒甚至亚角秒的精度是非常困难的。另外一种是利用已标定好的全日面太阳图像，如空间太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)<sup>[4]</sup>观测的全日面图像，将地面观测图像通过旋转、缩放和位移(即图像的相似变换)与其配准，从而得到相应的坐标转换参数。目前，大多数太阳物理学家就是采用这种方法，人工地通过试错法去调整参数，手工完成这种图像匹配。显然这种办法效率低下，而且精度无法保证。本文虽然同样沿用这种方案，但我们是通过计算机图像自动配准的技术来完成NVST高分辨图像和全日面像的匹配，从而实现NVST高分辨观测像标准化的日球坐标标定。这种方案面临的两个首要问题是：(1) 针对不同波段，如何选择合适的全日面参考像？图像配准要求两张图像上具有相同的特征结构，但并不是所有的NVST高分辨成像波段都可以找到完全对应的全日面参考像。NVST/氧化钛(titanium dioxide, TiO)7058 Å像可以和SDO上搭载的日震磁像仪(helioseismic and magnetic imager, HMI)连续谱基本对应，但H $\alpha$ 观测(6563 Å)就没有合适的空间观测相对应。唯一可以考虑的是和SDO大气成像仪(atmospheric imaging assembly, AIA)304 Å波段(以下简称AIA304)相匹配，但这两个波段的图像特征是有显著不同的。也可以考虑和地面全日面H $\alpha$ 观测做配准，如全球日震网(Global Oscillation Network Group, GONG)<sup>[5]</sup>，但GONG和SDO的日球坐标系不但有系统差，而且观测数据也不如SDO稳定。(2) 针对不同的局部像和参考像，采用何种匹配算法和预处理方法？匹配算法不但要解决旋转、缩放和位移，还要克服高分辨像视场较小、与全日面像分辨率差异极大的问题。高分辨观测的视场一般只有全日面像的1/200，而且像元分辨率相差5~10倍，比如SDO/HMI为0.5角秒/像元，而NVST/TiO则为0.05角秒/像元；GONG为1角秒/像元，AIA304为0.6角秒/像元，而NVST/H $\alpha$ 波段为0.136角秒/像元。除了采样分辨率之外，望远镜口径不同和视宁度大小造成两者的真实空间分辨率也差异巨大。全日面像相对于高分辨像细节更为模糊，局部特征不清晰，导致两者之间的特征难以直接对应。因此，图像预处理方案是一个关键点，其适当与否决定了匹

配算法是否可行，两者必须结合到一起才能得到理想的结果。

图像匹配方法一般分为两类：基于图像特征的特征点匹配法和基于区域信息的统计匹配法<sup>[6]</sup>。点匹配法可以获得很好的结果，但必须提取和测量一些特征点；而统计匹配法在处理单纯平移的情况下非常有效，但在考虑到旋转和缩放的时候，即便应用较多的傅里叶变换对数极坐标算法<sup>[7]</sup>也精度有限。2018年，冯涛等人<sup>[8]</sup>提出一种区域相关和控制点测量相结合的方法实现了NVST光球图像和SDO/HMI高精度的配准，但这一方法要求预先提供合适的视场初始参数，尤其是较为精确的旋转角，在实际应用中还是有一定的困难。

尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)是一种经典的基于特征点的图像匹配方法，此算法由Lowe<sup>[9]</sup>在1999年发表，并于2004年进行了完善。SIFT方法在图像处理中的应用非常普遍，文章引用率高达50000次，但在天文领域却很少被使用。2018年，杨盼等人<sup>[10]</sup>将这一方法应用到国家天文台怀柔太阳观测基地磁场图像的配准中，获得较好的效果。虽然SIFT方法已经具备非常好的鲁棒性，并采用多尺度分解，理论上能自适应分辨率的变化并自动选择合适的特征点，但如果直接用于NVST高分辨光球像和色球像与相应的全日面像匹配却难以获得非常好的结果。主要原因是其视场较小，而且两者分辨率差异巨大，导致局部细节完全不同，难以确定相似的结构。从图像匹配的本质上讲，相似性是制约匹配精度的关键因素。

我们的研究发现，如果对高分辨像做一些有针对性的预处理，然后再提取SIFT特征点进行点匹配，不但可以实现光球像的匹配，而且可以完成绝大多数色球像的配准工作，甚至能实现NVST/H $\alpha$ 波段到AIA304的坐标转换。本文即是对这一工作的总结，第1小节简要介绍了SIFT算法的基本原理；第2小节介绍了SIFT用于高分辨光球TiO像和SDO/HMI连续谱全日面像的配准；第3小节介绍了NVST/H $\alpha$ 像与GONG全日面色球像和AIA304像的配准；第4小节介绍了如何通过标准普适图像传输系统(flexible image transport system, FITS)文件头来标定视场；最后是讨论和结论。

## 1 SIFT图像配准方法基本原理

利用SIFT进行图像匹配主要包括3个步骤：特征点标识、特征点匹配和图像配准参数确定。特征点标识是在不同图像空间尺度上寻找具有旋转、缩放和平移

不变性的特征点. 首先, 通过多个高斯卷积核构建图像多尺度高斯金字塔. 其次, 比较金字塔相邻层, 定位局部极值点, 确定初步特征点, 再通过高阶函数拟合来精确定位局部极值点. 需要去除低对比度特征点和不稳定的边缘响应点, 以增强特征点的稳定性和抗噪声能力. 再次, 通过图像梯度获得局部结构稳定方向, 使得特征点描述具有旋转不变性. 每个特征点描述包括了尺度、位置和方向信息. 为了描述这些特征点的信息, 并使得其不随着强度、视角的变化而变化, 计算特征点在尺度空间内 $4 \times 4$ 的窗口中8个方向的梯度信息, 构成一个128维的特征点描述符向量. 这个描述符是局部区域图像信息的一种抽象, 并具有唯一性.

特征点匹配是建立图像与被匹配图像间SIFT特征点描述符之间的对应关系. 为减小噪声等干扰对匹配结果的影响, 同时为避免陷入局部极小情况, 匹配时可采用最近邻法, 即选择对应点之间SIFT描述符欧式距离最小, 且与次近距离比值小于某一阈值(Lowe采用的阈值为0.8)的一对特征点作为匹配点对. 这种配准方式计算量较大, 实际应用中, 可利用快速近似最近邻库(fast library for approximate nearest neighbors, FLANN)<sup>[11]</sup>减小算法复杂度.

确定图像配准参数, 即通过匹配点对求解齐次坐标变换矩阵, 获得图像和被匹配图像间的相似变换参数, 包括旋转角度、缩放比例和2个平移量, 共4个参数. 当缩放比例已知时, 则上述过程简化为3参数的欧氏变换. 理论上, 2个及以上匹配点对可得到图像间的对应关系. 此外, 为消除误匹配对结果的影响, 实际应用中, 采用抽样一致性算法(random sample consensus, RANSAC)<sup>[12]</sup>来提升匹配参数精度.

因此, 整个图像配准的流程为: 利用SIFT方法获得两幅图像的特征点和特征描述符向量; 利用FLANN获得初始匹配点对; 应用RANSAC迭代算法最终求解配准参数. 可以看出, 特征点获取和筛选是整个图像匹配的核心, 这决定了最终的精度. 匹配点对越多, 最后的精度越高.

这种方法计算复杂, 计算量较大. 但随着这一方法的不断发展和完善, 很多计算机语言已经将这一算法封装成标准代码库, 使得其可用性大为增强. 我们在本工作中即采用Python语言调用OpenCV库中的标准SIFT函数来实现上述操作. 对于经典的图像处理, 这一方法获得了非常好的配准效果, 但在处理天文图像的时候, 尤其是当面临的是视场较小、缩放比例巨大、

图像边缘较为模糊、高频信息缺乏并含有噪声的太阳图像的时候, 直接利用这一方法并不能取得良好的效果. 经过上述流程往往无法获得足够的匹配点对, 但因为在天文观测中有一些先验知识, 比如近似的比例尺和高分辨图像在全日面像中的大概位置, 可以利用这些先验知识, 先对图像进行预处理, 然后再使用SIFT算法. 从结果上看, 这一解决方案是可行的.

## 2 局部高分辨光球像与SDO/HMI连续谱全日面像的视场配准

无论空间还是地面观测, 相对于色球和日冕图像, 太阳光球图像的稳定性与像元分辨率都是较高的. 虽然光球观测也分为不同的波段, 如TiO, Gband或者连续谱, 但他们的基本结构是一致的, 米粒、黑子半影、本影这些特征结构都较为清晰. SDO/HMI连续谱和NVST/TiO观测除了高分辨细节(如光球亮点、半影纤维、本影亮点)外在大尺度上是非常一致的. 而且SDO/HMI是时间间隔45 s的连续观测, 也就是在 $\pm 22.5$  s的范围内就可以找到NVST局部像对应的全日面光球像. 这些就为将NVST图像映射到SDO日球坐标系带来了极大的便利条件. 图1显示了NVST/TiO像和SDO/HMI连续谱全日面像一个局部的对比. 两张图像具有同样的像元数(2048像元 $\times$ 1700像元), 其中图1(a)为NVST/TiO像, 视场约1.7角分 $\times$ 1.4角分; 图1(b)为SDO/HMI连续谱局部像, 视场约为17角分 $\times$ 14角分. NVST/TiO像的观测时间为世界时2017年09月05日03点41分47秒, SDO/HMI连续谱的观测时间为世界时2017年09月05日03点42分00秒. 图1(a)黑子对应图1(b)右上的黑子, 可以看出, 两者之间不但比例尺相差巨大, 同时还存在一个旋转角.

虽然SIFT方法通过多尺度来进行图像匹配, 但针对如此大的分辨率差异, 还是难以得到理想的结果. 通过望远镜光学系统参数计算和对图像数据的历史手工标定, 可以知道, NVST/TiO的像元分辨率大约在0.05角秒. 因此, 我们对图像进行如下预处理: 首先, 将TiO图像利用高斯核模糊并降采样到和SDO/HMI基本一致的分辨率, 也就是将图像缩小到原始图像的十分之一; 其次, 采用极坐标转换得到全日面径向中值轮廓, 从而扣除SDO/HMI像的临边昏暗现象, 保证全日面像的中心和边缘具有相似的灰度等级; 再次, 在利用OpenCV库进行SIFT特征点检测的时候, 要求输入的图像灰度值为8比特, 但我们要处理的图像一般为16比特整型或者

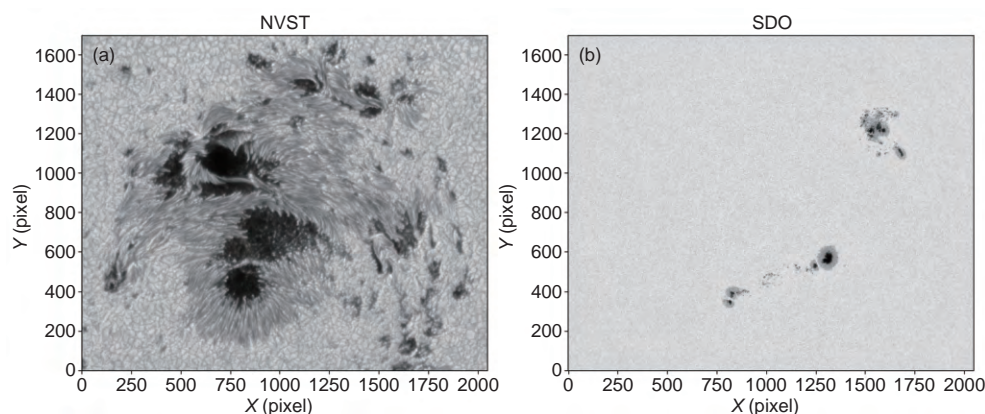


图 1 不同分辨率的图像对比. (a) NVST/TiO像; (b) SDO/HMI像. 图像尺寸均为2048像元×1700像元

Figure 1 Comparison of images with different resolutions. (a) NVST/TiO; (b) SDO/HMI. Sizes of both images are 2048 pixels×1700 pixels

浮点值图像, 这种灰度值的转换会降低图像的强度分辨率. 对于高分辨像, 可以直接采用全局最大最小值差作为变换系数. 但由于高分辨像的视场仅对应全日面像中很小的一个局部, 如果全日面像的全局灰度最大最小值位置不在高分辨视场范围内, 必然导致全日面像中对应的小视场不能充分利用8比特的灰度等级. 为了最大程度地保留图像灰度细节, 我们采用了从粗到精的迭代方案. 第一次, 采用全日面有效视场的全局最大最小值差作为变换系数, 计算粗略的图像匹配参数, 并得到大致的视场范围. 然后再迭代一次, 用这个粗略视场的局部最大最小值差作为最终的灰度变换系数, 再重新计算最终参数. 需要注意的一点是, SDO原始图像在匹配前要先进行标准化处理, 即根据其FITS头文件参数进行旋转角改正, 并将全日面日心坐标平移到

其图像中心位置.

图2(a)显示了NVST高分辨图像经过高斯模糊、降采样和灰度等级变换, 并进行SIFT特征点计算后的图像, 其中的圆圈代表检测出来的特征点. 在这张图上, 共检测到466个SIFT特征点. 第一次计算的时候, 在全日面像中共检测到1217个SIFT特征点. 经过FLANN匹配, 在全日面像和局部高分辨像中获得173组匹配点对. 第二次迭代的时候, 在对应的全日面小视场中获得386个SIFT特征点, 而匹配点对数量上升到223组. 采用RANSAC迭代计算即可获得这张高分辨像的像元比例尺为0.0515角秒, 旋转角 $-82.15^\circ$ , 视场中心位置对应SDO/HMI标准图像的像元坐标为(2467.250, 1631.630). 匹配后, 223组对应点对的均方根误差为0.17角秒. 根据这些参数, 即可获得SDO/HMI对应的区域. 为了对比方

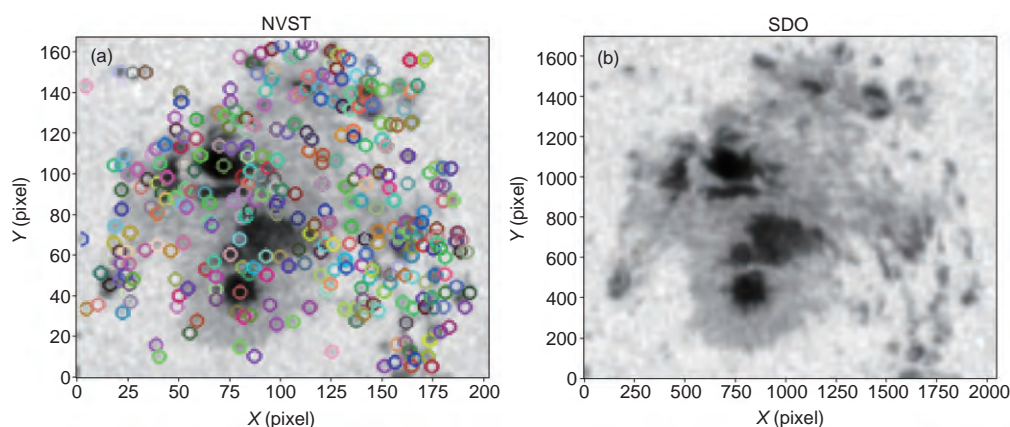


图 2 (网络版彩色)SIFT图像匹配特征点和结果. (a) 经过降采样和灰度等级变换的NVST/TiO图像(圆圈代表SIFT特征点); (b) 与NVST/TiO对应的SDO/HMI连续谱图像区域(图像分辨率放大到0.0515角秒/像元)

Figure 2 (Color online) SIFT feature points and matching results. (a) NVST/TiO image after downsampling and gray scale transformation with circles representing SIFT points; (b) SDO/HMI continuum corresponding to NVST/TiO with image resolution enlarged to 0.0515 arcsec/pixel



便,我们将这一区域的图像放大到和NVST/TiO局部像相同的图像尺寸显示在图2(b)中,可以看到其与图1(a)重合得非常好。

这一方法不但对活动区光球图像的匹配有效,同时也可以非常好地处理宁静区。图3显示了NVST/TiO于世界时2018年09月19日02点04分04秒的观测结果和对应的SDO/HMI于2018年09月19日02点04分30秒的配准结果。图3(a)为NVST/TiO图像,图3(b)为SDO/HMI对应区域图像放大的结果。在这个图像匹配中,共获得564组对应点对,匹配后的均方根误差也为0.17角秒。

我们测试了NVST在过去5年中的多个TiO观测视场,所有样本都可以很好地与SDO/HMI连续谱图像匹配,匹配后的均方根误差均小于0.25角秒,即SDO/HMI的半个像元。甚至当视宁度非常不好、高分辨重建像质量很低的时候,依然可以进行图像匹配。

如果观测图像上有异常点,如平暗场未处理掉的热点、坏像素、脏点、干涉条纹等,虽然它们可能在第一步被标识成为一个SIFT特征点,但在第二步特征点匹配的过程中,这些点绝大多数都会被剔除掉,因为不大可能在高分辨像和全日面像上同时有相同结构的异常点。而第三步利用RANSAC测量图像匹配参数的时候,误匹配点的影响还会被进一步压缩。因此,SIFT方法有较好的容错能力。

### 3 H $\alpha$ 高分辨像与GONG, AIA304像的匹配

无论是NVST还是GST, H $\alpha$ 高分辨局部像都是一个观测的重点,它反映了太阳色球的特征情况。非常遗憾的是,SDO上并没有完全对应的波段,最接近的是AIA304,但其包含了色球层和过渡区的贡献。虽然有

相似的部分,从物理本质上反映的却是不同的信息。

地基观测有相当多的全日面H $\alpha$ 观测,但较为稳定是GONG。GONG包括按照全球地理经度基本上均匀分布的6个观测站,理想情况下,同一时刻有2~3个站点可以观测太阳,从而保证对太阳的24小时的连续监测。时间分辨率为1分钟,像元分辨率为1角秒,观测图像是按照标准流程进行统一转换到日球坐标系。但与空间观测相比,地基观测最大的问题是受到天气情况的制约,天空的云遮挡和视宁度变化给数据质量带来了非常大的不确定性。因此,如果和GONG配准,首先要对全日面像进行筛选,然后再利用和光球相同的流程进行图像匹配。

相对于光球图像,色球图像表现得更为模糊,这导致使用SIFT方法能检测到的特征点远远少于光球像。NVST/H $\alpha$ 的像元分辨率约为0.13~0.16角秒,但考虑到GONG受到的视宁度影响,在初始统一两者分辨率的时候,要根据实际情况使用比处理光球像更大的高斯模糊核。以世界时2014年11月10日07点07分07秒的NVST/H $\alpha$ 高分辨像为例,降采样后能获得的SIFT特征点为35个,如图4所示。而GONG全日面测到240个,迭代后获得的匹配点对仅为5组,匹配后均方根误差为0.95角秒。为了在最后求解过程中避免由于匹配点太少而引起的参数不稳定,在第一次处理的时候,以已知的像元分辨率为固定参数,仅求解欧氏变化参数中的旋转和位移,而在第二次迭代的时候,再完整求解相似变换中的4个参数。

一般情况下,NVST/H $\alpha$ 图像和GONG匹配点对少于10个,测量误差在1~2角秒,但通常是可以直接完成匹配的。可是在实际中,有些时候GONG的观测由于仪

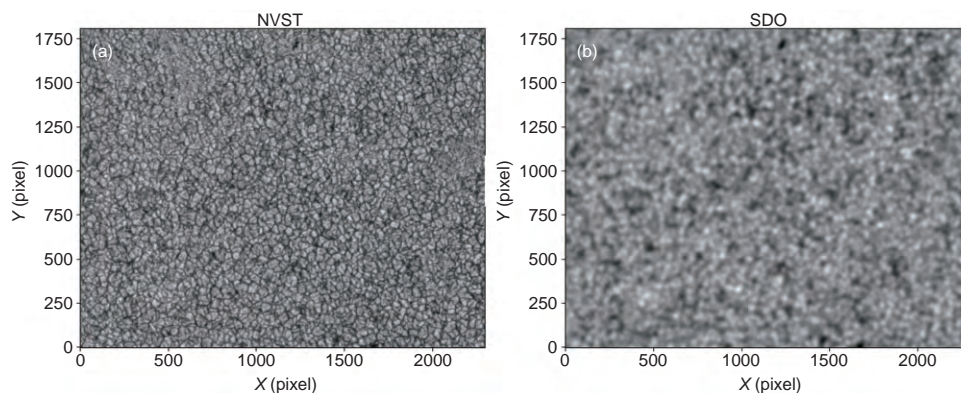


图3 太阳宁静区对应匹配结果。(a) NVST/TiO像;(b) SDO/HMI像  
Figure 3 Matching results in the quiet sun. (a) NVST/TiO; (b) SDO/HMI continuum

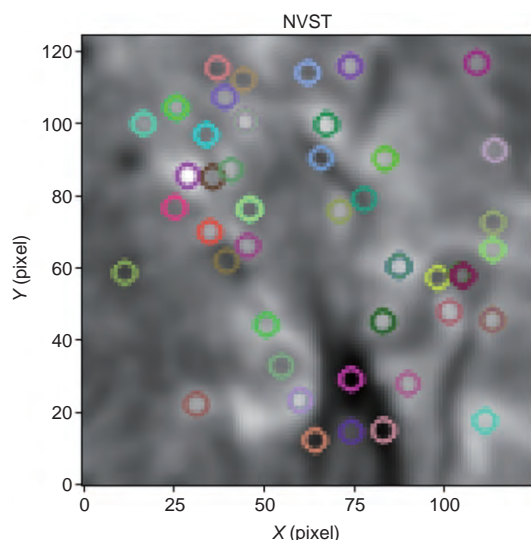


图4 (网络版彩色)经过降采样和灰度等级变换的NVST/H $\alpha$ 图像. 圆圈代表SIFT特征点

Figure 4 (Color online) NVST/H $\alpha$  image after downsampling and gray scale transformation. Circles represent SIFT points

器或者天气的原因, 会产生几个站点均没有观测的情况. 还有些时候一些站点的GONG图像并没有准确统一到标准的日球坐标系, 比如旋转角未改正, 尤其是和经度最为靠近的澳大利亚观测站常常有这种情况发生. 另外, GONG和SDO全日面像的日球坐标系是有B0角和L0角的系统差的, 其原因是地面观测和空间观测的视差. 这就使得即便能匹配GONG全日面图像, 也要进一步通过坐标转换再过渡到SDO日球坐标系, 以便和HMI或者AIA的数据匹配. 因此, 我们也尝试了如何直接和AIA304像进行配准.

在AIA304上, 黑子和大多数暗条与在H $\alpha$ 波段上的表现是完全不同的, 只有一些增亮的结构可以对应, 而且这些结构的尺寸也有所不同. 因此, 我们在提取SIFT特征点的时候, 预处理时仅考虑视场中那些亮度结构高于平均亮度的点. 同时, AIA304的辐射亮度变化范围远大于H $\alpha$ 波段, 因此要先对图像灰度进行对数变换. 为降低误匹配数量, 采用了进一步迭代的方式: 先将NVST/H $\alpha$ 图像和GONG做两次迭代匹配, 获得其在GONG坐标系的日面位置, 然后再和AIA304做精确匹配. 注意, AIA不需要执行去除临边昏暗的步骤. 但即便经过迭代处理, 通常情况下仅能获得5个左右的匹配点用于求解坐标转换参数, 匹配后的均方根误差也在1角秒左右. 但如果NVST的观测目标是色球宁静区或者是一个单纯的暗条, 没有任何增亮的结构, 就无法实现和AIA304的匹配.

图5显示了图4原始NVST观测数据与GONG和AIA304的匹配结果. 可以看到, NVST观测和GONG之间的差异主要体现在分辨率上, 而与AIA304不但亮度不同, 而且结构上也有差异.

#### 4 FITS文件头坐标参数的设定

FITS文件作为标准的天文图像文件格式, 其文件头可以通过关键字来描述各种观测信息. 标准的太阳软件包(Solar SoftWare, SSW)<sup>[13]</sup>也提供了很多基于FITS文件头信息的处理工具. 为了和SSW兼容, 我们采用SDO的标准关键字描述NVST图像视场坐标.

在通过图像匹配获得NVST像与全日面图像转换的4个参数后, 用CDELTA1和CDELTA2关键字代表图像的

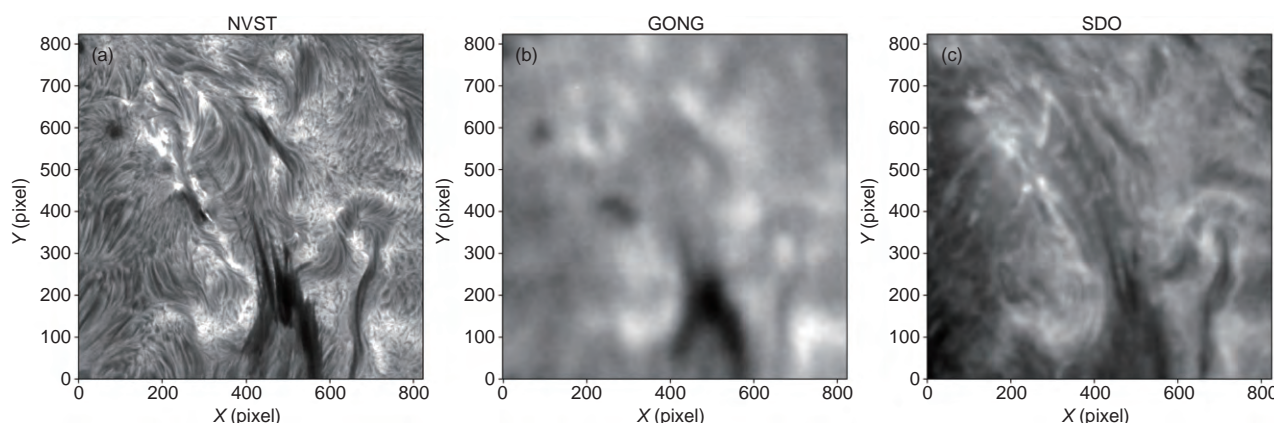


图5 H $\alpha$ 像匹配结果. (a) NVST/H $\alpha$ 高分辨图像; (b) GONG图像的对应该场; (c) SDO/AIA304的对应该场

Figure 5 The matching results of H $\alpha$  images. (a) NVST/H $\alpha$  high resolution image; (b) GONG's corresponding field of view; (c) SDO/AIA304's corresponding field of view



像元分辨率, 单位为角秒; CROTA1和CROTA2代表图像的旋转角, 单位为度; CRPIX1和CRPIX2分别代表日面中心相对于NVST图像坐标系原点的水平和垂直位置, 单位是像元. 同时我们也给出了图像中心相对日面中心的位置, 用CROTACN1和CROTACN2表示, 单位为角秒. 为了便于使用者记录所采用的全日面参考像, 将参考像的标准文件名也保留在FITS头信息中.

经过这种标准化的处理, 就可以产生新的NVST视场标定图像, 并可以直接利用SSW中的fits2map函数投影到日球坐标系上(图6)与其他SDO数据进行配准, 也可以进一步利用SSW进行各种标准化处理, 如进行P0, B0, L0角修正并转换到经纬度坐标系, 或者投影改正等. NVST同一时刻的TiO和H $\alpha$ 观测也自然而然地衔接到一起. 需要注意的一点是, 如果将NVST局部像和SDO全日面像配准, 对应的SDO图像也需要利用SSW的hmi\_prep或者aia\_prep函数进行标准化.

## 5 讨论和结论

用这一方法, 还成功地将NVST/H $\alpha$ 远线翼的偏带(如 $\pm 0.7 \text{ \AA}$ ,  $\pm 0.8 \text{ \AA}$ )图像、美国GST观测的TiO/Gband图像和对应的全日面SDO/HMI连续谱进行了匹配, 也将南京大学光学和近红外太阳爆发探测望远镜(Optical and Near-infrared Solar Eruption Tracer, ONSET)<sup>[14]</sup>的H $\alpha$ 像与SDO/AIA进行了配准. 还尝试了利用SIFT方法进行同一目标红/蓝偏带的高分辨像对齐.

为了方便使用, 运用Python语言和SunPy库<sup>[15]</sup>实现

了SDO数据和GONG数据的自动下载. 也就是说, 用户只需要提供一张NVST的高分辨图像, 代码就会从其FITS的头信息中自动解析观测日期和时间, 然后自动到SDO或者GONG数据库中下载与其时间最为临近的HMI, AIA或者GONG数据. 由于GONG数据的不确定性, 会自动下载3张图像作为备选. 另外, 还进行图像下载的重复性检查, 以避免对同一数据的多次下载. 为了提高匹配成功率, 针对H $\alpha$ 高分辨像和AIA304的匹配, 还设计了一个专用的交互界面. 用户可以利用鼠标在全日面图上框出大概的观测区域, 这样就可以限制特征点的候选区域, 以及提高8比特灰度转换时的强度分辨率, 增加SIFT特征点个数.

这一方法也是有缺陷的. 最终匹配误差来源主要包括如下几个方面: (1) 整个方法是基于特征点检测的, 匹配精度也就完全依赖图像特征. 光球像的特征明显, 图像对比度高, 能检测到的对应点就多, 最终匹配的成功率和精度就高; 而色球像能检测到的特征点本来就少, 对应的匹配点对更少. 在与GONG的匹配时, 还要根据全日面图像的质量来调整相应的参数, 这样最终的精度就有一定的不确定性. 对于一些只显示出黑子和暗条的H $\alpha$ 图像, 几乎就不可能和AIA304对应. 另外, 日面边缘和色球宁静区由于在全日面图上难以找到对应特征, 所以也无法匹配. (2) NVST高分辨像是通过短曝光像重建而得到的, 有些时候还残存低频的大气抖动畸变, 这意味着它和空间全日面像之间并不是一个标准的4参数相似变换, 图像配准后必然有一定的残差.

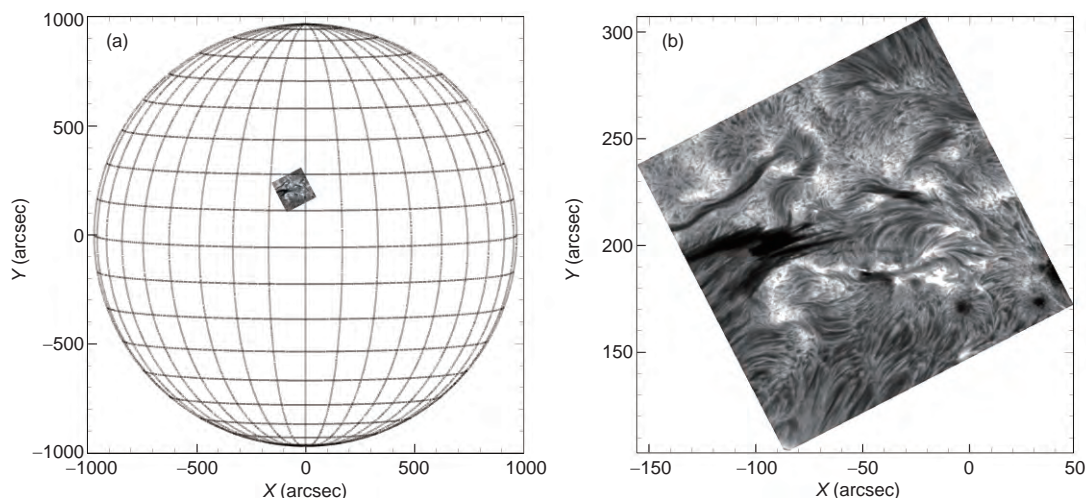


图6 NVST/H $\alpha$ 图像在日球坐标系上的标定结果. (a) 全日面视场; (b) 局部视场

Figure 6 The NVST/H $\alpha$  images mapped to the heliographic coordinates. (a) Full disk view; (b) local view

虽然理论上只要特征点足够多, 就可以利用更为复杂的图像变换公式, 但FITS文件头并不能定义复杂的坐标变换参数, 从而无法使用标准SSW函数进行处理. (3) 无论是SDO还是GONG, 其观测时间和NVST观测时间很难严格同步, 这样在视场配准的时候, 其实是将不同时刻的图像放到一起匹配, 虽然这个差异可能非常小. (4) SDO图像本身的像元分辨率为0.5~0.6角秒, 实际的空间分辨率为1角秒, 这也限制了最终的匹配精度.

对于一组连续的时间序列观测, 可以首先通过区域互相关进行自身的视场序列对齐, 然后再选取其中一张作为基准进行日球坐标标定, 这样就可以得到整

个观测序列的日球坐标位置. SIFT特征提取方法还有一些变种, 我们也希望能对这一方法进行更深入的研究, 并结合区域统计的方法, 使得太阳高分辨像和全日面像的匹配鲁棒性更好、精度更高. 总体来讲, 通过各种优化, 现在这套方法可以基本满足太阳物理学家对NVST高分辨像的日球坐标标定的需求, 实现了高分辨观测像的标准化日球坐标标定, 为太阳物理学家更好地使用高分辨观测数据提供了极大的便利, 从而提高了数据利用率和科学产出. 这套方法将最终融合到NVST的观测数据的发布系统中, 或者独立开放为科学数据用户使用.

## 参考文献

- 1 Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New Vacuum Solar Telescope and observations with high resolution. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 705–718
- 2 Goode P R, Denker C J, Didkovsky L I, et al. 1.6 m solar telescope in Big Bear: The NST. *J Korean Astron Soc*, 2003, 36: 125–133
- 3 Wang R, Xu Z, Chen Y C, et al. Field calibration of multiband high resolution imaging system with New Vacuum Solar Telescope (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2018, 38: 116–123 [王瑞, 徐稚, 陈宇超, 等. 新真空太阳望远镜多波段高分辨率成像系统的视场定标. *光学学报*, 2018, 38: 116–123]
- 4 Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 3–15
- 5 Leibacher J W. The Global Oscillation Network Group (GONG) project. *Adv Space Res*, 1999, 24: 173–176
- 6 Zitová B, Flusser J. Image registration methods: A survey. *Image Vision Comput*, 2003, 21: 977–1000
- 7 Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *IEEE Trans Image Proc*, 1996, 5: 1266–1271
- 8 Feng T, Dai W, Wang R, et al. High-accuracy registration method of solar high-resolution observation images and full-disk solar images (in Chinese). *Astron Res Technol*, 2018, 15: 69–77 [冯涛, 戴伟, 王瑞, 等. 太阳高分辨观测图像与全日面像的高精度配准方法. *天文研究与技术*, 2018, 15: 69–77]
- 9 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vision*, 2004, 60: 91–110
- 10 Yang P, Zeng S G, Liu S, et al. Registration and location method of solar magnetic field images based on scale-invariant feature point matching (in Chinese). *Astron Res Technol*, 2018, 15: 59–68 [杨盼, 曾曙光, 刘锁, 等. 基于尺度不变特征点匹配的太阳磁场图像配准与定位方法. *天文研究与技术*, 2018, 15: 59–68]
- 11 Muja M, Lowe D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration. In: Ranchordas A, Araujo H, eds. *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. Setubal: INSTICC-Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication, 2009. 331–340
- 12 Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun ACM*, 1981, 24: 381–395
- 13 Freeland S L, Handy B N. Data analysis with the SolarSoft system. *Sol Phys*, 1998, 182: 497–500
- 14 Fang C, Chen P F, Li Z, et al. A new multi-wavelength solar telescope: Optical and Near-infrared Solar Eruption Tracer (ONSET). *Res Astron Astrophys*, 2013, 13: 1509–1517
- 15 The SunPy Community, Mumford S J, Christie S, et al. SunPy—Python for solar physics. *Comput Sci Disc*, 2015, 8: 014009



Summary for “太阳局部高分辨观测像的日球坐标自动标定”

## An automatic approach of mapping the solar high-resolution image to Helioprojective-Cartesian coordinates system

Kaifan Ji<sup>1\*</sup>, Hui Liu<sup>1,2</sup>, Zhenyu Jin<sup>1</sup>, Zhenhong Shang<sup>2</sup> & Zhenping Qiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

<sup>2</sup> Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;

<sup>3</sup> College of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

\* Corresponding author, E-mail: jkf@ynao.ac.cn

The ground-based solar high-resolution observation usually only covers a small part of the solar disk, so determining the field of view position of an observed image on the Helioprojective-Cartesian coordinates is the first step in data processing. In the present, most solar physicists manually adjust parameters by trial and error to complete this step, because the mapping information may not be included in the flexible image transport system (FITS) header of a raw image. The manual approach cannot guarantee the accuracy. It is inefficient and has plagued many solar physicists. In this paper, we propose an automatic mapping approach by registering a high-resolution image to a standard calibrated solar full disk using image pre-processing and scale-invariant feature transform (SIFT) technology. Following steps are included. (1) Downsampling and blurring a high-resolution image to roughly fit the scale and the resolution of its corresponding full disk image; (2) scaling the gray level to 256 by local minimum and maximum to meet the requirements of applying the standard OpenCV SIFT processing package; (3) removing the limb-darkening of the reference full disk image with Cartesian to polar coordinate transform method; (4) detecting the feature points by SIFT on both high-resolution and full disk images; (5) matching corresponding point pairs by fast library for approximate nearest neighbors (FLANN); (6) calculating translation, rotation and scale parameters by random sample consensus (RANSAC); (7) recording the registration results in FITS header with standard keywords of the Solar Dynamics Observatory (SDO) image. These keywords can be automatically retrieved by the Solar SoftWare (SSW) system. With this approach, we have successfully registered both active region and quiet sun images observed by the titanium dioxide (TiO) band of the New Vacuum Solar Telescope (NVST) to the continuum of the helioseismic and magnetic imager (HMI) instrument on the SDO, and H $\alpha$  active region images of NVST to the Global Oscillation Network Group (GONG) with high accuracy (0.25 arcsec for photosphere and 1 arcsec for chromosphere). If a high-resolution image shows bright structures, such as flares, the H $\alpha$  image of NVST could be registered to 304 Å image of the atmospheric imaging assembly (AIA) on SDO with the accuracy of 1 arcsec as well. In addition, the images observed by H $\alpha$  blue/red wings ( $\pm 0.7$  Å) of NVST, TiO of the Goode solar telescope (GST), H $\alpha$  of the Optical and Near-infrared Solar Eruption Tracer (ONSET) are also successfully registered to SDO/HMI continuum or SDO/AIA 304 Å full disk image. Iterative processing is applied to improve accuracy. An automatic SDO or GONG image downloading procedure and an extra interactive user interface are also integrated. This approach has met the requirement of mapping a high-resolution image to the Helioprojective-Cartesian coordinates of full disk. Its weakness is that if a high-resolution image does not show high contrast, such as limb observation of photosphere or quiet sun of chromosphere, it is difficult to get a mapping result, because the whole strategy is based on image feature detection. The procedure will be merged into the observation system of NVST in the future, and will provide great convenience for the solar physicists to use the high-resolution observation data.

**solar high-resolution image, solar full disk image, Helioprojective-Cartesian coordinate, calibration for the field of view**

doi: 10.1360/N972019-00092