



空间望远镜图像天体测量定标——以“卡西尼”窄视场照相机为例

郭碧峰^{1,2}, 彭青玉^{1,2*}, 陆星^{1,2}, 郝佳男^{1,2}

1. 暨南大学信息科学技术学院, 广州 510632;

2. 暨南大学中法天体测量、动力学与空间科学联合研究实验室, 广州 510632

*联系人, E-mail: tpengqy@jnu.edu.cn

收稿日期: 2022-11-05; 接受日期: 2022-12-08; 网络出版日期: 2023-03-20

国家重点研发计划(编号: 2022YFE0116800)、中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究项目(编号: CMS-CSST-2021-B08)、国家自然科学基金(编号: 11873026, 11273014)和国家自然科学基金天文联合基金重点项目(编号: U1431227)资助

摘要 天体测量定标是高精度位置测量的基础. 空间望远镜图像的天体测量定标是我国计划于2024年发射的空间站工程巡天望远镜需要突破的关键技术. 本文以“卡西尼”(Cassini)飞行器窄视场照相机(Narrow Angle Camera, NAC)拍摄的图像为例, 探究了CCD图像天体测量定标技术, 希望为拓展应用到我国即将发射的空间站工程巡天望远镜提供有益的参考. 具体地, 本文选取了NAC在五个历元(2006, 2008, 2010, 2014, 2016)拍摄的具有不同指向和取向观测密集星场的图像, 探究了空间图像高精度天体测量的归算方法, 求解出了各历元的CCD扭曲模型. 相比目前其他学者的归算结果, 本文在恒星的位置测量精度上有较大的提高. 对于在2.6 s曝光时间11–12星等(Gaia-G星等)的恒星, 平均($O-C$) (The Observed Minus Computed)的标准差在 x 和 y 坐标方向分别约为0.04像素(约提高0.5倍)和0.03像素(约提高1倍). 通过分析各历元图像的扭曲模型, 本文发现在飞行器执行任务期间CCD图像的扭曲保持了良好的稳定性. 在 1024×1024 像素尺度下, 几何扭曲的最大值、中值、最小值分别为 0.184 ± 0.023 , 0.038 ± 0.005 和 0.007 ± 0.003 像素. 根据求解扭曲的平均模型, 本文提供了模型的数值表达式及改正方法.

关键词 空间望远镜, 视场定标, CCD图像处理, 天体测量, 几何扭曲

PACS: 95.10.Jk, 95.55.Aq, 95.55.Fw, 95.75.Mn, 95.75.Pq

1 引言

中国空间站工程巡天望远镜(China Space Station Telescope, CSST)预计于2024年前后投入科学运行, 主要用于开展大规模多色成像与无缝光谱巡天工作. 该

项目将极大地推进从太阳系到宇宙学各方向的研究^[1]. 在CSST发射与投入科学运行前, 科学团队需要解决许多关键问题与技术, 例如观测任务的规划、数据的传输与处理方法等. 对于CSST的前期科学准备工作, Yan等人^[2]提出了微引力透镜的视差求解方法; Cao等

引用格式: 郭碧峰, 彭青玉, 陆星, 等. 空间望远镜图像天体测量定标——以“卡西尼”窄视场照相机为例. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 249512
Guo B F, Peng Q Y, Lu X, et al. Improved astrometric calibration of Cassini narrow angle camera images and its accurate geometric distortion model (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 249512, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0422](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0422)

人^[3]讨论了宇宙光学和近红外背景的各向异性; Xie等人^[4]探究了吸积白矮星的搜索方法; Li等人^[5]对星团中多星族的搜索方法进行了讨论. CSST计划分配70%的运行时间用于巡天观测. 巡天模块主焦面由30片CCD拼接而成, 其中18片用于多波段成像观测. CCD成像的点扩散函数80%能量集中度半径不大于0.15角秒, 且具有良好的角分辨率. CSST的巡天任务包括了400平方度的多色成像深场观测, 其星像的质量影响引力透镜效应的精确测量^[1]. 图像天体测量定标和扭曲的稳定性测量是图像堆叠和深场观测任务需解决的技术问题. 本文将从CCD图像天体测量定标和扭曲稳定性方面进行探究, 以“卡西尼”(Cassini)窄视场照相机(Narrow Angle Camera, NAC)的定标技术为例, 希望为拓展应用到我国空间站工程巡天望远镜的定标技术提供有益的参考.

NAC是卡西尼飞行器科学成像系统(Imaging Science Subsystem, ISS)的重要模块, 从中获得的观测资料是提供木星卫星(以下简称“木卫”)和土星卫星(以下简称“土卫”)高精度位置的重要途径. 这些关键的位置信息对它们的轨道改进与动力学研究有重要意义. Porco等人^[6]使用卡西尼图像测量了木卫Metis和Adrastea的位置并改进了轨道; Cooper等人^[7]使用NAC获得的观测资料, 归算并获得了木卫Amalthea和Thebe的天体测量位置. 后来, Cooper等人^[8]使用NAC的观测资料新发现了一颗土卫Anthe. 近十年来, 许多学者也发表了更多土卫的位置信息. 例如, Tajeddine等人^[9]发表了土卫Mimas和Enceladus的位置信息; Cooper等人^[10]从可分辨卫星相互靠近的图像获得了中等大小土卫的高精度位置信息. 学者们通常基于已开发的Caviar软件包^[11]进行图像处理和进行天体测量归算. 近几年来, Caviar软件包也得到了不断的完善和改进. 例如, Zhang等人^[12,13]还分别开发了恒星自动配准功能模块和假星自动剔除功能模块. 借助于Gaia星表^[14]准确的恒星位置信息和Caviar软件包定心算法的改进, 天体测量的归算结果精度也有了较显著的提高^[15].

天体测量定标是高精度位置测量的基础. 在较差天体测量(Differential Astrometry)中, 通常可以使用以下两种方法进行准确的视场定标. 一是拟合高阶底片常数模型(例如四阶多项式), 但需要视场中有足够的定标星. 二是改正视场的几何扭曲后再拟合低阶底片常数模型(例如4常数模型), 此时只需要2颗以上的定

标星, 但需要提前求解出准确的扭曲模型. 对于NAC获得的观测图像, 视场中有时只能探测到几颗参考星. 因此, 求解出准确的几何扭曲模型是准确定标的关键. 2003年, Owen使用定标场图像求解并提供了NAC的几何扭曲模型. 此后, Owen求解的扭曲模型一直被学者们采用并用于NAC图像的天体测量定标, 尚未有其他学者发表或提供新的模型. 例如, Tajeddine等人^[9]和Caviar软件包^[11]均使用Owen提供的扭曲模型进行视场定标. 本文中, 我们将探究NAC图像的高精度天体测量归算方法, 求解出多个不同历元的几何扭曲模型, 分析视场扭曲的稳定性, 并与Owen提供的扭曲模型进行对比. 基于准确的CCD扭曲模型, NAC的天体测量潜力能够被充分地挖掘.

本文的第2节介绍了NAC的参数与观测资料. 第3节探究了空间图像的天体测量归算方法. 第4节探究了CCD几何扭曲的求解方法, 分析了几何扭曲在各观测历元的稳定性. 最后一部分进行了总结, 并提出CSST视场定标的观测需求.

2 观测资料

卡西尼NAC获得的观测资料通常用于发现新的天体和进行高精度位置测量, 其基本参数的介绍如下. NAC望远镜的焦距长约为2 m, CCD像素大小为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$, 每个像素使用12位进行存储. 其像素比例尺约为1.24角秒每像素, CCD尺寸为 1024×1024 像素. 在卡西尼执行科学任务期间, 照相机也采用像素合并(Binning)的观测模型, 因此也会读出 512×512 或 256×256 像素尺寸的图像. 关于卡西尼照相机的更多参数介绍, 读者可参考文献[16].

为了更加方便地探究NAC图像的天体测量归算方法和分析各历元几何扭曲的稳定性, 本文选取了具有不同指向(Pointing)和取向(Orientation)对于密集星场五个历元的观测资料, 如表1所示. 本文使用的观测资料可从行星数据中心获取(Planetary Data System, <https://pds-imaging.jpl.nasa.gov/>).

本文获取了2006, 2008, 2010, 2014和2016观测历元的图像. 对于2006和2008观测历元的图像, 望远镜的指向基本相同, 但取向变化较大. 望远镜使用相同取向观测一组图像后会旋转约 30° 再进行下一组图像的观测, 每个历元共观测了7组图像. 在2006历元以10幅图

表 1 观测资料概要

Table 1 Observations overview

Epoch (UT)	Size (pixel)	Exposure (s)	Image series	Stars	Frames
2006-08-01	1024 × 1024	2.6	N1533083910–N1533095430	~130	7 × 10
2008-09-28	1024 × 1024	2.6	N1601334486–N1601342286	~130	7 × 7
2010-01-04	512 × 512	82.0	N1641293235–N1641299259	~320	25
2014-11-03	512 × 512	220.0	N1793710214–N1793753305	~140	51
2016-01-21	512 × 512	46.0	N1832037163–N1832083123	~830	69

像为一组, 而2008历元以7幅图像为一组. Zhang等人^[15]也对这两个历元同样的观测资料集进行了归算, 将在本文的第3节进行归算结果的比较. 对于2010, 2014和2016观测历元的图像, 它们的指向变化较大, 但取向基本相同, 视场中均有足够的参考星来方便求解CCD的几何扭曲. 求解的扭曲模型及相关分析将在本文的第4节进行讨论.

3 空间图像天体测量归算

3.1 归算方法

对于每幅图像, 本文使用如下步骤进行数据归算: 第一步, 由于星像欠采样, 使用了比高斯拟合方法更优的修正矩定心算法^[15]测量每个星像的像素坐标(x , y). 本文中, 设图像左上角为像素的坐标原点, x 轴坐标值往右为增加, y 轴坐标值往下为增加. 第二步, 把像素坐标中探测到的星像与Gaia DR3星表^[14]相匹配. 本文在匹配中剔除了星表中RUWE (Re-normalised Unit Weight Error)值大于2.0的恒星以避免由双星系统带来的位置误差^[17]. 第三步, 根据飞行器拍摄图像时的位置、速度信息计算每颗匹配恒星在天球坐标观测时刻的站心视位置^[18]. 接着, 通过投影公式把每颗恒星在天球坐标的站心视位置(α , δ)转换到标准坐标(ξ , η)^[19]. 第四步, 使用加权的高阶多项式(例如四阶多项式)底片常数模型进行求解^[20]. 最后, 我们能根据求解的底片常数模型计算出每颗恒星的观测位置.

对于2006和2008观测历元的资料, 本文对每组具有相同取向的观测资料依次进行归算, 共归算了14组观测资料. 对于每一组资料, 我们计算出每颗恒星观测位置的 $\langle O-C \rangle$ (The Observed Minus Computed)及其标准差. 从归算结果中发现, 对于2006和2008历元的观测资料, 每个历元的观测资料在两个像素坐标轴(x 轴

和 y 轴)都存在电荷转移效率(Charge Transfer Efficiency, CTE)问题. CTE效应来源于CCD图像的读出过程. 卡西尼NAC相机的CCD在完成一幅图像的曝光后, 各像素位置的计数值被一行行地存入寄存器并逐个读出. 计数值每读出一行, 剩余的每行都会往读出方向转移一行, 而这种转移的效率并不能达到完美的100%, 从而产生了CTE效应. 因此, 越后读出的像素受的影响越大. 根据Lin等人^[21], 我们通过拟合星等与 $\langle O-C \rangle$ 之间的关系进行了CTE效应的改正. 类似的现象也发生在Gaia卫星图像^[22]和我国云南天文台1 m光学望远镜的观测资料中^[21]. 根据Bautz等人^[23], CTE的影响可能与观测时CCD的温度变化有关, CCD温度较低时可能会造成更大的影响. 对于其中的几组观测资料, CTE的影响并不明显. 从这两个历元的归算结果中, 我们并未发现CTE的影响与观测时间或取向角度的相关性. 图1展示了分别在 x 轴和 y 轴CTE效应最显著的归算结果, 其中图1(a)展示了图像序列号为N1533083910–N1533084270在2006历元时恒星观测位置的 $\langle O-C \rangle$ 在 x 轴的分布情况, 图1(b)展示了图像序列号为N1601342046–N1601342286在2008历元时恒星观测位置的 $\langle O-C \rangle$ 在 y 轴的分布情况. 在2010, 2014和2016观测历元的归算结果中, 图像采用了Binning = 2的模式进行读出, 卡西尼团队也可能对望远镜的参数进行了优化, 我们并未发现明显的CTE效应.

3.2 归算结果的比较

Zhang等人^[15]基于Caviar软件包也归算了2006和2008历元相同序列片段的观测资料. 他们使用了改进的定心算法——修正矩进行定心, 恒星的准确度和精度有了较显著的提高. 本文选择了与文献^[15]相同的观测资料(共56幅图)且相同像素区域(图像中间724 × 724像素区域)的恒星进行了归算和结果的比较. 图2展

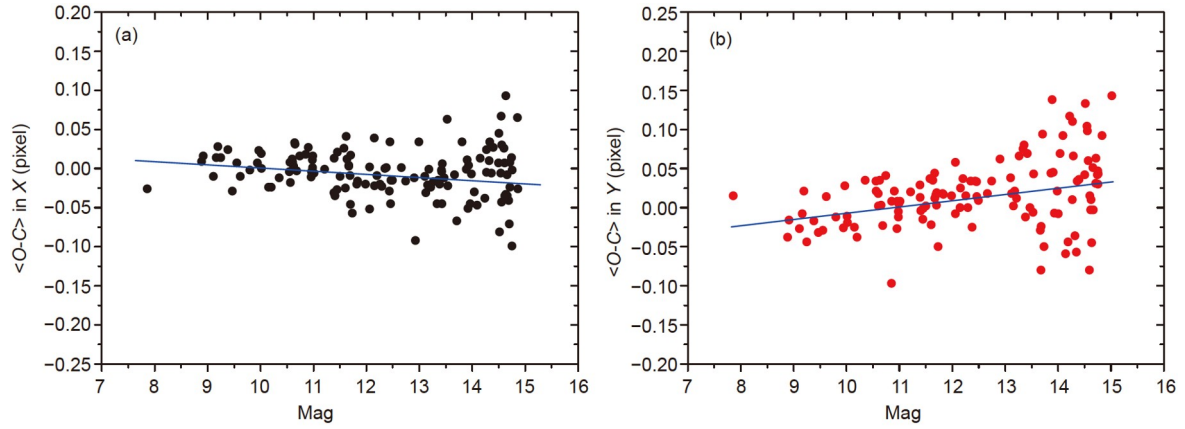


图 1 (a) 2006 历元观测图像序列为 N1533083910–N1533084270 归算结果 $\langle O-C \rangle$ 与 Gaia-G 星等在 x 坐标轴的分布情况; (b) 2008 历元观测图像序列为 N1601342046–N1601342286 归算结果 $\langle O-C \rangle$ 与 Gaia-G 星等在 y 坐标轴的分布情况. 子图中实线为拟合的直线

Figure 1 (a) Distributions of $\langle O-C \rangle$ s with Gaia-G magnitude in x -axis by the series images of N1533083910–N1533084270 at epoch 2006; (b) right panel shows the distributions of $\langle O-C \rangle$ s with Gaia-G magnitude in y -axis by the series images of N1601342046–N1601342286 at epoch 2008. The line is shown by the linear fitting in each panel.

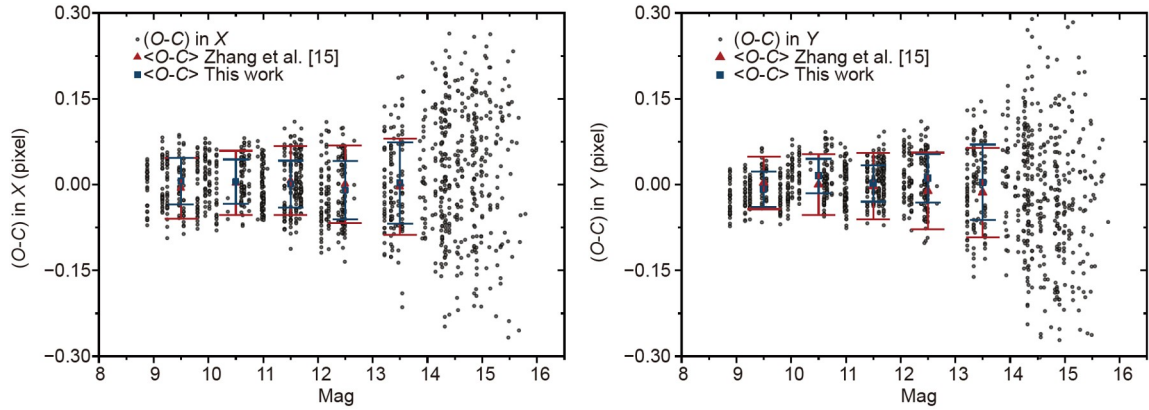


图 2 两幅子图分别展示了对比图像恒星观测位置 $(O-C)$ 与星等之间的关系在 x 轴与 y 轴的分布情况. 在每个子图中, 每个空心圆表示本文中单次测量的 $(O-C)$, 红色和蓝色的点分别展示了 Zhang 等人^[15]和本文对于各星等间分段统计的 $(O-C)$ 的平均值, 相应的误差棒为标准差

Figure 2 The left and right panel show the distributions of $(O-C)$ s in x -axis and y -axis with Gaia-G magnitude for the observations for comparison, respectively. In each panel, an open circle shows an individual $(O-C)$ of a star. The red and blue plots show the mean of $(O-C)$ of Zhang et al. [15] and this work in segments and the error bars show the corresponding standard deviations.

示了本文归算的恒星观测位置的 $(O-C)$ 分别在 x 轴和 y 轴方向的分布情况, 图 3 则展示了 $\langle O-C \rangle$ 的标准差随星等的分布, 并使用乙状函数进行了拟合. 为了方便归算结果的比较, 图 2 中的每个子图也根据星等的分段统计显示了 Zhang 等人^[15]与本文归算结果中恒星观测位置 $(O-C)$ 的平均值和标准差, 其中标准差以误差棒的形式显示. 本文对于 9–14 星等恒星的归算结果, 在每一个星等之间 (即 9–10, 10–11, 11–12, 12–13 和 13–14 星等) 进行了统计和比较. 明显地, 本文在测量精度 (恒星观测位置 $(O-C)$ 的标准差) 上有较大的改善, 其中在 y 轴方向

更为显著. 例如, 对于 11–12 星等 (Gaia-G 星等) 的恒星, $(O-C)$ 均值的标准差在 x 轴和 y 轴分别为约 0.04 和 0.03 像素, 而 Zhang 等人^[15]在两个坐标均为约 0.06 像素. $(O-C)$ 均值的差异则主要来源于 CTE 效应的改正. 在 2006 和 2008 历元, NAC 获取的图像存在与 x 方向水平的相干噪声^[16], 故总体上 x 方向的精度比 y 方向差. 而部分暗星在 x 方向精度较低可能是由 y 轴方向读出的 CTE 效应更不稳定导致的. 在 2010 历元后, 卡西尼团队采用了 Binning = 2 的模式读出图像并可能优化了照相机的参数, 故观测的图像无明显相干噪声和明显的 CTE 效应.

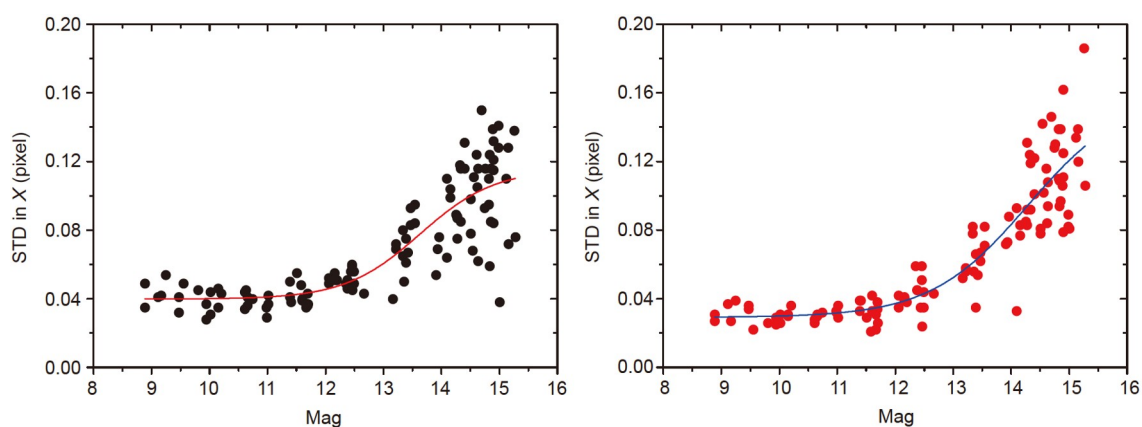


图 3 (网络版彩图) 两幅子图分别展示了对比图像恒星观测位置 $\langle O-C \rangle$ 的标准差与星等之间的关系在 x 轴与 y 轴的分布情况. 实线是使用乙状函数拟合的结果

Figure 3 (Color online) The left and right panel show the standard deviations of $\langle O-C \rangle$ in x -axis and y -axis with Gaia-G magnitude for frames in comparison, respectively. The solid lines are fitted by sigmoidal functions.

下面, 我们将从归算过程中分析Zhang等人^[15]和本文中归算结果的差异. 第一, 本文参考了最新的Gaia DR3星表提供的恒星位置信息, 并在匹配过程中剔除了星表中RUWE值大于2.0的恒星. 第二, 本文使用了加权方案对底片常数模型进行拟合. 第三, 本文使用了四阶多项式对底片常数模型进行拟合, 而Zhang等人^[15]使用的是扭曲改正后的线性底片常数模型. 第四, 本文对CTE效应进行了改正. 然而, 认为仅仅是上述归算过程的区别不会导致结果的精度有如此大的差异. 于是, 怀疑Zhang等人^[15]用于扭曲改正的模型与实际观测中扭曲模型存在一定的差异. 在本文的下一部分, 将探究各历元中的CCD的几何扭曲模型及稳定性, 并与Zhang等人^[15]使用的扭曲模型进行比较.

4 几何扭曲模型分析

4.1 几何扭曲求解

对表1中每个历元的观测资料进行CCD扭曲模型的求解. 根据Peng等人^[24]对扭曲的定义, 我们认为在某个像素区域, 通过4常数模型归算后(考虑平移、旋转和缩放效应)恒星观测位置 $\langle O-C \rangle$ 的中值就是这个区域的扭曲. 此时, 认为星表提供的理论位置是准确的, 而采用残差的中值作为扭曲值可以有效地避免随机误差(例如宇宙射线)的影响.

对于每个历元的观测资料, 扭曲求解的步骤如下. 第一步, 使用加权4常数模型进行归算, 归算步骤见本文第3.1节, 加权方案见Lin等人^[20]. 第二步, 计算出每

幅图像所有匹配恒星观测位置的 $\langle O-C \rangle$ 并进行CTE改正(若存在). 第三步, 对同一历元所有恒星观测位置的 $\langle O-C \rangle$ 进行统计. 具体地, 我们把像素坐标划分成一个 8×8 方格区域, 对于每个区域计算出 $\langle O-C \rangle$ 的中值作为该区域的扭曲值. 最后, 使用四阶多项式来拟合每个历元的扭曲模型. 图4显示了五个历元观测资料拟合扭曲残差数值的分布情况. 前五个子图分别显示了2006, 2008, 2010, 2014和2016历元拟合扭曲残差的分布, 最后一个子图显示了五个历元平均残差在 1024×1024 像素尺度下的分布. 各子图的上方也分别显示了 x 和 y 方向拟合残差的均值和标准差. 我们并未发现拟合的残差分布有系统的趋势. 由于图像长曝光受热噪声、宇宙射线等影响, 2010 (曝光时间为82 s)和2014 (曝光时间为220 s)历元观测资料的拟合残差中存在较大的随机误差.

在 1024×1024 像素尺度下, 本文对各求解历元的扭曲数值进行平均, 并使用一个四阶多项式将其拟合作为扭曲的最终模型, 其拟合的系数如表2所示. 根据表2中多项式的系数, 我们可使用式(1)和(2)对CCD扭曲进行改正,

$$\begin{cases} x' = x - f_x(x \cdot \rho, y \cdot \rho) / \rho, \\ y' = y - f_y(x \cdot \rho, y \cdot \rho) / \rho, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} f_x(x, y) = \sum_{i, j, 0 \leq i+j \leq 4, i, j \in N} a_{ij} x^i y^j, \\ f_y(x, y) = \sum_{i, j, 0 \leq i+j \leq 4, i, j \in N} b_{ij} x^i y^j, \end{cases} \quad (2)$$

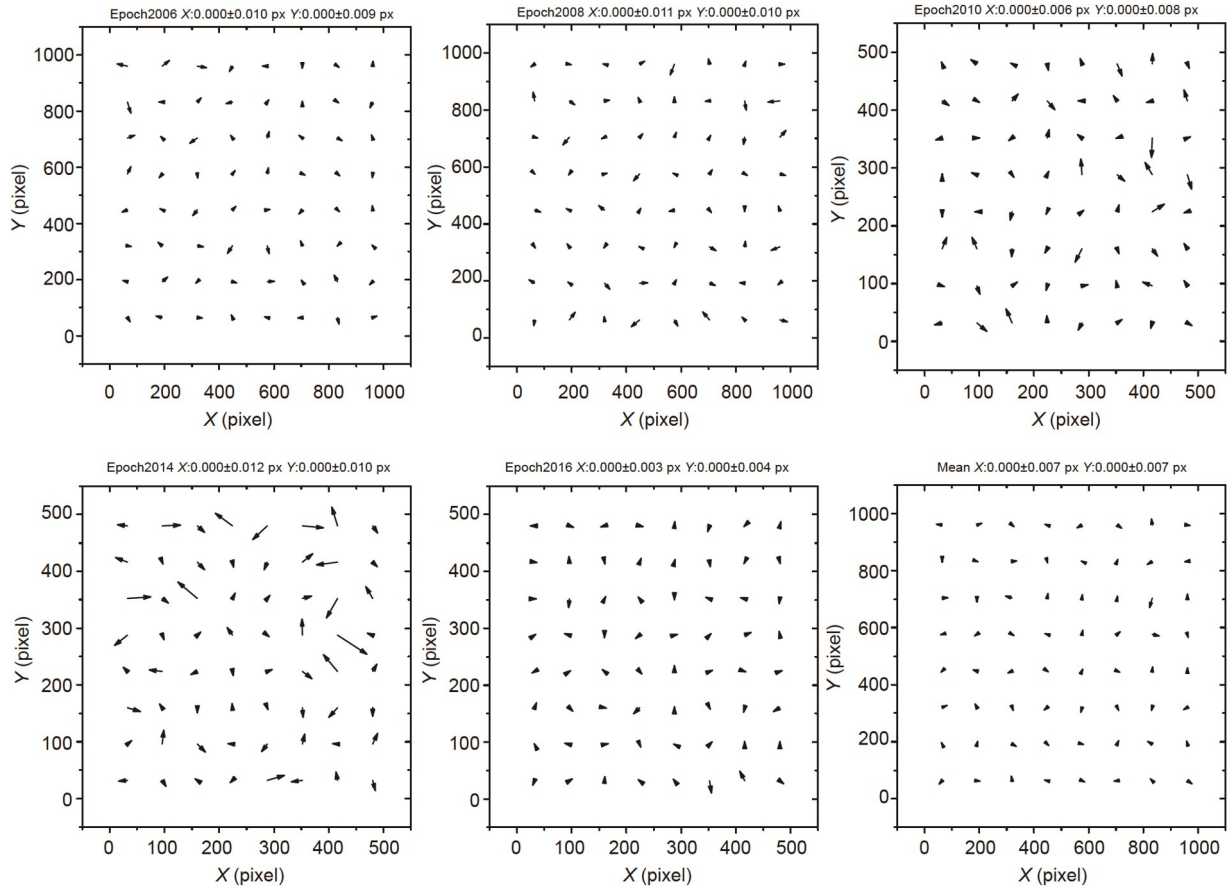


图 4 扭曲拟合残差分布图. 每个子图的矢量值被放大了1500倍. 子图的上方展示了扭曲拟合残差的历元和数值信息

Figure 4 The vector graphs of geometric distortion residuals. For each panel, a factor of 1500 is used to exaggerate the magnitude of each vector. The information of epoch and numerical information is shown above each panel.

表 2 式(2)中拟合的多项式参数

Table 2 Parameters of numeric expressions for eq. (2)

Items	Parameters in f_x	Items	Parameters in f_y	Items	Parameters in f_x	Items	Parameters in f_y
a_{40}	0.5605	b_{40}	0.1183	a_{03}	-0.2092	b_{03}	2.3243
a_{31}	0.0197	b_{31}	0.0539	a_{20}	-0.2286	b_{20}	0.5012
a_{22}	0.2241	b_{22}	-0.2685	a_{11}	-0.7503	b_{11}	-1.5865
a_{13}	-0.0431	b_{13}	0.4869	a_{02}	-0.3322	b_{02}	-1.8966
a_{04}	0.1193	b_{04}	-0.9057	a_{10}	0.3357	b_{10}	0.8047
a_{30}	-0.4546	b_{30}	-0.3124	a_{01}	0.3585	b_{01}	0.9765
a_{21}	-0.3859	b_{21}	1.5833	a_{00}	-0.0645	b_{00}	0.2523
a_{12}	0.9899	b_{12}	-0.5454	—	—	—	—

其中 (x, y) 为改正前的像素坐标, (x', y') 为改正后的像素坐标, p 为像素合并因子(Binning Factor). 例如, 在 1024×1024 , 512×512 和 256×256 的像素尺度下, 该因子应分别设为1, 2和4.

图5展示了卡西尼NAC的六个扭曲模型. 其中第一个(左上角)子图是Owen提供的扭曲模型. Owen于2003年4月分析了卡西尼NAC观测M35疏散星团的观测图像, 发现NAC扭曲是非线性的, 于是使用了含3个

参数的多项式对NAC的扭曲模型进行描述. 该模型尚未公开发表, 本文根据Cooper等人^[7]中的参数转换得到, 并换算到 1024×1024 像素尺度. 其余五个子图显示的扭曲模型由表1中各历元的观测资料求解得到. 对于Owen模型的形状, CCD中心的扭曲最小, 边缘的扭曲最大, 扭曲呈放射线状向四周发散. 对于本文求解出的扭曲模型形状, CCD角落处扭曲最大, 其他区域像一个环形指向CCD的中央. 从形状上, 使用各观测资料求解的扭曲是相近的, 但不同于Owen在2003年提供的扭曲模型. 大多数CCD的几何扭曲呈对称形状, 例如我国姚安观测站 0.8 m ^[25]和云南天文台 1 m 望远镜^[26]的CCD扭曲都呈对称状. 然而, 我们求解的NAC几何扭曲并非呈对称状, 根据Porco等人^[16]的描述, 这可能是CCD的左侧(x 轴坐标为0的一侧)硅介质外延层与CCD之间

不恰当的黏合引起的. 表3列出了NAC扭曲模型数值上的一些细节. 具体地, 在 1024×1024 像素尺度下, 本文求解的CCD图像视场扭曲模型的最大值、中值、最小值分别为 0.184 ± 0.023 , 0.038 ± 0.005 和 0.007 ± 0.003 像素. 因此, 在卡西尼执行任务期间, 我们发现在NAC的几何扭曲在形状和数值上都是保持稳定的.

4.2 讨论

图6两幅子图分别展示了本文求解最终模型的矢量图和Owen的模型与本文最终模型之差的矢量图. 从图6(b)可见, 本文求解的平均模型与Owen提供的模型存在较明显的系统差, 这也与Zhang等人^[15]中“偏离中心区域的星像有更大的系统差”的描述相符. 其中CCD中央的系统差最小, 边缘的最大, 中值为 0.107 像

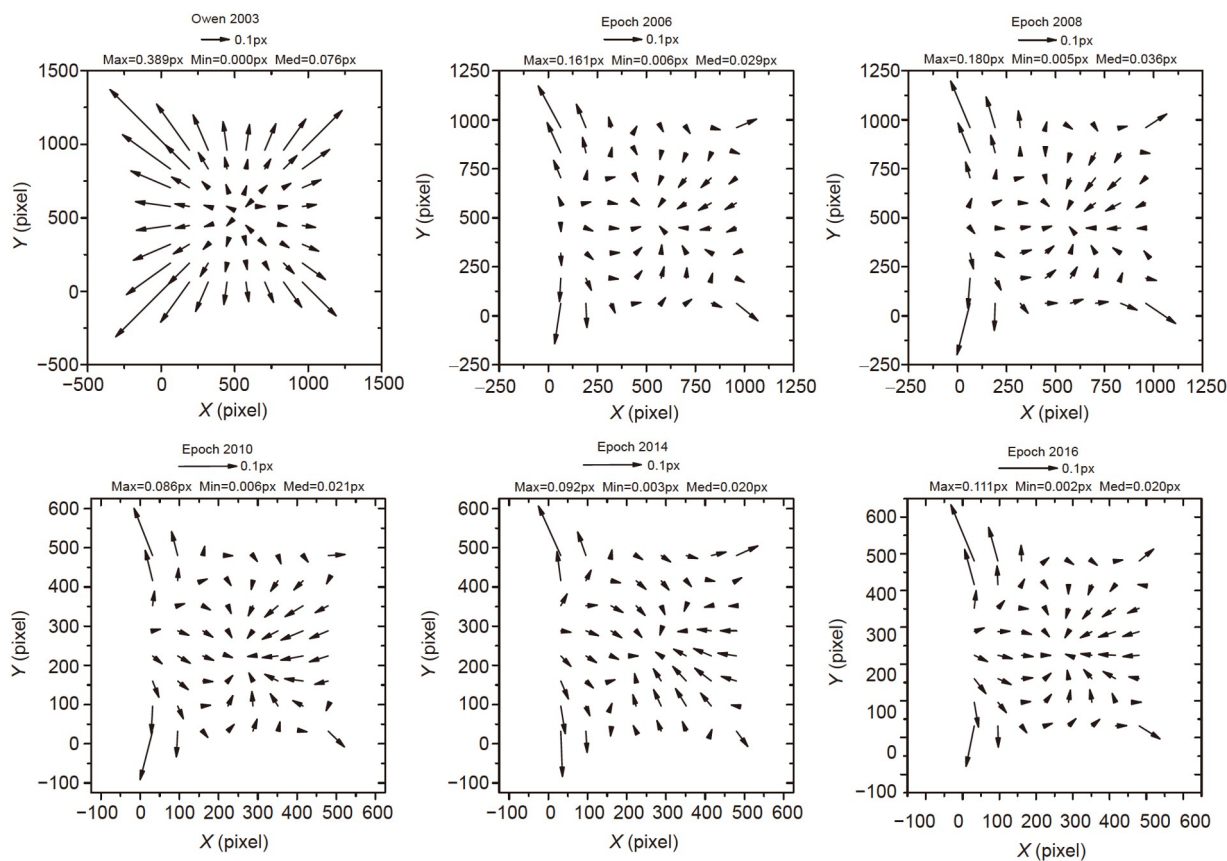
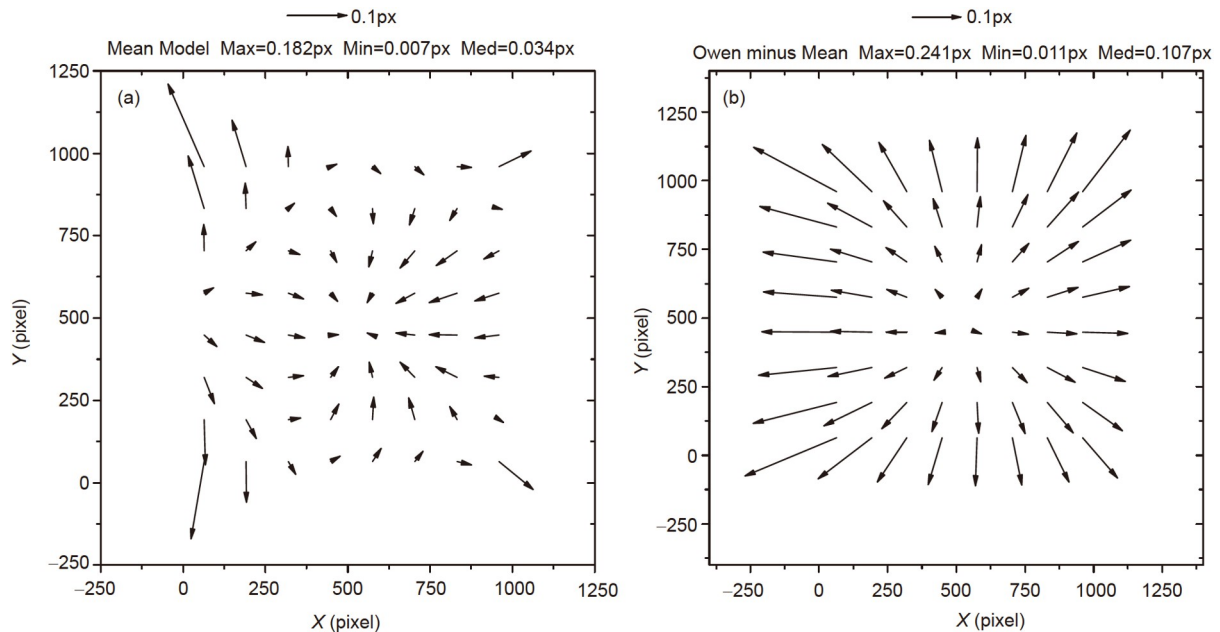


图5 扭曲模型矢量图. 左上角子图是Owen在2003年提供的扭曲模型, 其他子图是本文通过不同历元的观测资料求解的扭曲模型. 每个子图的矢量值被放大了1500倍. 子图的上方展示了扭曲模型的详细历元和数值信息. 第一行的三个子图是 1024×1024 像素尺度, 而第二行的三个子图是 512×512 像素尺度

Figure 5 The vector graphs of geometric distortion models. The panel of the top left is the model of Owen in 2003 and other panels present the models solved by the observations at different epochs. For each panel, a factor of 1500 is used to exaggerate the magnitude of each geometric distortion vector. The information of epoch, maximum, median and minimum of the values are shown above each panel. The top three panels are in the 1024×1024 pixel image, while the bottom three are in the 512×512 pixel image.

表 3 1024×1024 像素尺度下Owen在2003年和本文求解的各历元扭曲模型的最大值、中值和最小值**Table 3** The table shows the maximum, median and minimum of the geometric distortion models of Owen and from the observations at five different epochs in the 1024×1024 pixel image

Model	Epoch	Maximum (pixel)	Medium (pixel)	Minimum (pixel)
Owen	2003	0.389	0.076	0.000
	2006	0.161	0.029	0.006
	2008	0.180	0.036	0.005
	2010	0.172	0.042	0.012
This work	2014	0.184	0.040	0.006
	2016	0.222	0.040	0.004
	Total	0.184 ± 0.023	0.038 ± 0.005	0.007 ± 0.003

**图 6** 1024×1024 像素尺度下的平均的扭曲模型(a)矢量图和Owen模型(b)与平均扭曲模型之差的矢量图. 各子图中的扭曲矢量被放大了1500倍**Figure 6** The solved mean geometric distortion model and the difference model between the mean model (a) and Owen's model (b), respectively in the 1024×1024 pixel image. A factor of 1500 is used to exaggerate the magnitude of each geometric distortion vector in each panel.

素. 这种差别也可能来源于Owen的模型仅使用3个参数的三阶多项式表示, 而只有3个参数的三阶多项式模型不能较准确地描述该CCD的几何扭曲.

下面, 我们将评估使用Owen的模型进行改正后对实际位置测量结果的影响. 对于一幅在像素坐标 (x_1, y_1) 处的图像, 该影响主要由以下两部分组成: 一是视场中所有定标星对于Owen模型与实际模型偏差(如图6(b)所示)的平均扭曲矢量, 将该矢量记为 $\mathbf{e}_1$; 二是图像中在像素坐标为 (x_1, y_1) 处视场实际的扭曲矢量(如图6(a)所示), 将该矢量记为 $\mathbf{e}_2$. 则造成位置测量结果的

影响为 $\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2$. 例如, 当定标星均位于视场的右上角, $\mathbf{e}_1$ 的模长较大. 此时, 对于视场左下角位置的定标影响最大, 约为0.4像素. 但对于密集星场的观测图像, 由于星像在视场中基本是均匀分布的, 故 $\mathbf{e}_1$ 通常很小. 在这种情况下, 使用Owen提供的模型进行视场扭曲改正后使用低阶底片常数模型(例如4常数模型)也能较准确地进行视场定标.

为进一步验证本文求解扭曲模型的准确性和底片常数模型的拟合效果, 我们使用了对五个历元的图像基于不同底片模型的对比分析试验, 并对各历元归算

表 4 使用不同底片模型归算结果的准确度在五个观测历元图像的比较

Table 4 The comparison of the results of accuracy using different plate models of the observations at five epochs

$\langle O-C \rangle_{\text{sep}}$		ln X (pixel)		ln Y (pixel)		
Epoch	4-para	30-para	4-para_GDC	4-para	30-para	4-para_GDC
2006 (<13 mag)	0.024	0.018	0.014	0.041	0.021	0.014
2008 (<13 mag)	0.030	0.020	0.013	0.040	0.027	0.017
2010 (<15 mag)	0.023	0.014	0.016	0.032	0.021	0.022
2014 (<16 mag)	0.023	0.019	0.020	0.028	0.018	0.020
2016 (<15 mag)	0.024	0.018	0.018	0.026	0.017	0.019

表 5 使用不同底片模型归算结果的精度在五个观测历元图像的比较

Table 5 The comparison of the results of precision using different plate models of the observations at five epochs

STD		In X (pixel)		In Y (pixel)		
Epoch	4-para	30-para	4-para_GDC	4-para	30-para	4-para_GDC
2006 (<13 mag)	0.050	0.044	0.043	0.044	0.033	0.034
2008 (<13 mag)	0.050	0.045	0.044	0.043	0.037	0.035
2010 (<15 mag)	0.033	0.033	0.032	0.044	0.043	0.043
2014 (<16 mag)	0.050	0.042	0.048	0.043	0.036	0.041
2016 (<15 mag)	0.042	0.038	0.039	0.062	0.057	0.060

结果的准确度和精度进行了量化. 具体地, 分别使用了加权4常数、改正扭曲后加权4常数和30常数底片模型(四阶多项式)三种方法分别进行了归算结果的比较. 我们使用了 $\langle O-C \rangle$ 在亮星的弥散程度(标准差)来表示归算结果的准确度, 亮星 $\langle O-C \rangle$ 标准差的中值表示归算结果的精度. 对于2006和2008历元, 由于星像位置同时受CTE效应和扭曲的影响, 比较时仅考虑了扭曲的影响. 表4和5分别展示了五个历元使用不同底片模型(加权4常数、加权30常数和改正扭曲后加权4常数)归算的结果. 总体上, 使用4阶多项式(30常数)底片模型相比4常数底片模型在准确度上有较显著的提高, 而在精度上提高的程度较小. 在已知视场扭曲的情况下, 改正扭曲后使用加权的4常数模型对存在CTE效应的观测资料(2006和2008历元)有更好的效果. 对于CTE效应不明显的观测资料, 使用4阶多项式(30常数)底片模型进行归算能够得到最好的位置测量结果, 改正扭曲后使用加权4常数模型可以得到与30常数模型近似的结果. 上述结果同样表明了本文求解的扭曲模型是

准确的, 且在多个历元中保持了良好的稳定性. 有了更加准确的扭曲模型, 可以更加准确地对NAC图像进行天体测量定标.

5 总结与展望

本文探究了空间望远镜CCD图像天体测量的定标技术. 以卡西尼NAC观测的图像为例, 归算了共5个历元(2006, 2008, 2010, 2014, 2016)具有不同指向和取向观测密集星场的图像, 求解出了各历元CCD图像的扭曲模型. 我们发现NAC观测图像的扭曲模型在多个历元期间保持了良好的稳定性, 也修正了Owen在2003年提供的扭曲模型. 对于我国即将于2024年发射的CSST的天体测量定标工作, 可以通过观测具有不同指向和取向密集星场的图像, 并求解CCD图像的几何扭曲来实现. 本文对于卡西尼NAC视场定标的方法希望为拓展应用到CSST巡天模块和多通道成像仪模块的定标工作提供有益的参考.

致谢 感谢Nick Cooper和郭振鹏对本工作观测图像的筛选与获取提供的帮助.

参考文献

- 1 Zhan H. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 1290–1298 [詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天. 科学通报, 2021, 66: 1290–1298]
- 2 Yan S, Zhu W. Measuring microlensing parallax via simultaneous observations from Chinese Space Station Telescope and Roman Telescope. *Res Astron Astrophys*, 2022, 22: 025006
- 3 Cao Y, Gong Y, Liu D, et al. Anisotropies of cosmic optical and near-IR background from the China space station telescope (CSST). *Mon Not R Astron Soc*, 2022, 511: 1830–1840
- 4 Xie W, Chen H L. Possibility of searching for accreting white dwarfs with the Chinese Space Station Telescope. *Res Astron Astrophys*, 2022, 22: 055003
- 5 Li C, Zheng Z, Li X, et al. Searching for multiple populations in star clusters using the China Space Station Telescope. *Res Astron Astrophys*, 2022, 22: 095004
- 6 Porco C C, West R A, McEwen A, et al. Cassini imaging of Jupiter's atmosphere, satellites, and rings. *Science*, 2003, 299: 1541–1547
- 7 Cooper N J, Murray C D, Porco C C, et al. Cassini ISS astrometric observations of the inner jovian satellites, Amalthea and Thebe. *Icarus*, 2006, 181: 223–234
- 8 Cooper N J, Murray C D, Evans M W, et al. Astrometry and dynamics of Anthe (S/2007 S 4), a new satellite of Saturn. *Icarus*, 2008, 195: 765–777
- 9 Tajeddine R, Cooper N J, Lainey V, et al. Astrometric reduction of Cassini ISS images of the Saturnian satellites Mimas and Enceladus. *Astron Astrophys*, 2013, 551: A129
- 10 Cooper N J, Murray C D, Lainey V, et al. Cassini ISS mutual event astrometry of the mid-sized Saturnian satellites 2005–2012. *Astron Astrophys*, 2014, 572: A43
- 11 Cooper N J, Lainey V, Meunier L E, et al. The Caviar software package for the astrometric reduction of Cassini ISS images: Description and examples. *Astron Astrophys*, 2018, 610: A2
- 12 Zhang Q F, Lainey V, Cooper N J, et al. First astrometric reduction of Cassini Imaging Science Subsystem images using an automatic procedure: Application to Enceladus images 2013–2017. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 481: 98–104
- 13 Zhang Q F, Lu Z C, Zhou X M, et al. Automatic removal of false image stars in disk-resolved images of the Cassini Imaging Science Subsystem. *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 100
- 14 Gaia C, Brown A G A, Vallenari A, et al. Gaia Early Data Release 3. *Astron Astrophys*, 2021, 649: A1
- 15 Zhang Q F, Zhou X M, Tan Y, et al. A comparison of centring algorithms in the astrometry of Cassini imaging science subsystem images and Anthe's astrometric reduction. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 505: 5253–5259
- 16 Porco C C, West R A, Squyres S, et al. Cassini imaging science: Instrument characteristics and anticipated scientific investigations at Saturn. *Space Sci Rev*, 2004, 115: 363–497
- 17 Zheng Z J, Peng Q Y, Vienne A, et al. A deeper solution to the actual geometry of CCD mosaic chips. *Astron Astrophys*, 2022, 661: A75
- 18 Kaplan G H, Hughes J A, Seidelmann P K, et al. Mean and apparent place computations in the new IAU system. III. Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars. *Astron J*, 1989, 97: 1197
- 19 Green R M. Spherical Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
- 20 Lin F R, Peng J H, Zheng Z J, et al. Characterization of the precision premium in astrometry. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 490: 4382–4387
- 21 Lin F R, Peng Q Y, Zheng Z J. Using Gaia DR2 to solve differential colour refraction and charge transfer efficiency issues. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 498: 258–264
- 22 Prusti T, de Bruijne J H J, Brown A G A, et al. The Gaia mission. *Astron Astrophys*, 2016, 595: A1
- 23 Bautz M W, Burke B E, Cooper M, et al. Toward fast, low-noise charge-coupled devices for Lynx. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2019, 5: 1
- 24 Peng Q Y, Vienne A, Zhang Q F, et al. A convenient solution to geometric distortion and its application to Phoebe's observations. *Astron J*, 2012, 144: 170

- 25 Guo B, Peng Q, Chen Y, et al. The astrometric performance test of 80 cm telescope at Yaoan Station and precise CCD positions of Apophis. [Res Astron Astrophys](#), 2022, 22: 055007
- 26 Shang Y J, Peng Q Y, Zheng Z J, et al. New CCD astrometric observations of Himalia using Gaia DR2 in 2015–2021. [Astron J](#), 2022, 163: 210

Improved astrometric calibration of Cassini narrow angle camera images and its accurate geometric distortion model

GUO BiFeng^{1,2}, PENG QingYu^{1,2*}, LU Xing^{1,2} & HAO JiaNan^{1,2}

¹ College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

² Sino-French Joint Laboratory for Astrometry, Dynamics and Space Science, Jinan University, Guangzhou 510632, China

The astrometric calibration of images taken from the China Space Station Telescope (CSST) is the key technique for preparing the CSST, which should start scientific operations around 2024. Taking the astrometric calibration of Cassini ISS images as an example, we hope to provide a reference for the images taken from the CSST. Observations of Cassini narrow angle camera with different orientations and pointings at dense star fields over five epochs (epochs 2006, 2008, 2010, 2014, and 2016) are used to perform astrometric reduction and to derive accurate geometric distortion models. For each frame, the star image centroids from the modified moment method are matched with the newest Gaia DR3 catalog and calculated to their topocentric apparent positions. Then, we reduce the observations using a fitted weighted fourth-order polynomial plate model and correct the effect of the charge transfer efficiency (CTE) issues (if they exist). To derive the geometric distortion model at each epoch, a weighted four-parameter plate model is used to calculate and derive the ($O-C$)s (the observed minus computed) of stars. We calculate the median of the ($O-C$)s in each area of a divided 8×8 box in the pixel coordinate after considering the effect of CTE. Finally, we fit the geometric distortion model at each epoch. Compared with the reduction results of Zhang et al. (2021), our results show a considerably improved precision of the stars. For brighter stars (e.g., 11–12 mag with an exposure time of 2.6 s), the standard deviations of the mean ($O-C$) are ~ 0.04 and ~ 0.03 pixels (approximately a 0.5- and 1.0-fold improvement, respectively) on the x - and y -axes, respectively. The geometric distortion models are stable over the five epochs. In the 1024×1024 pixel image, the maximum, median, and minimum of the geometric distortion values are 0.184 ± 0.023 , 0.038 ± 0.005 , and 0.007 ± 0.003 pixels, respectively, which differ from Owen's model in 2003. The mean geometric distortion model, as well as the correction method, is given in this work.

space telescope, astrometric calibration, CCD image processing, astrometry, geometric distortion

PACS: 95.10.Jk, 95.55.Aq, 95.55.Fw, 95.75.Mn, 95.75.Pq

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0422](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0422)