

数据论文

太阳光球层小尺度涡流机器识别标准数据集

谢 权 刘佳佳

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

(深空探测全国重点实验室 合肥 230026)

摘 要 位于宁静区的小尺度光球涡流通常被认为是米粒等离子体流动自然形成的, 并且其可能在向太阳高层大气输送能量的过程中发挥关键作用. 然而通过人为识别获取到的小尺度涡流参数存在很大的局限性和误差, 可能会导致对小尺度涡流总数的低估. SST (Swedish 1-meter Solar Telescope) 和 Hinode/SOT (Solar Optical Telescope) 望远镜对太阳光球层实现高时空分辨率、高质量的观测, 给光球层小尺度涡流的研究提供了充足的数据支持. 研究改进了太阳小尺度涡流机器识别及关键参数提取算法并形成了相应工具软件. 本数据集包含 2007 年 SOT 望远镜观测的一块宁静区光球层区域 (像元大小为 39.2 km, 时间间隔约为 6.4 s), 以及 2012 年 SST 望远镜观测的一块宁静区光球层区域 (像元大小为 43.6 km, 时间间隔为 8.25 s). 本数据集可在涡流相关特性在太阳不同区域、太阳活动周不同阶段的分布以及形成机制等研究中发挥重要作用.

关键词 太阳光球层, 小尺度涡流, 机器识别, SST, SOT

中图分类号 P353

数据集基本信息

数据集名称	太阳光球层小尺度涡流机器识别标准数据集
数据通信作者	刘佳佳 (jiajiali@ustc.edu.cn)
数据作者	谢权, 刘佳佳
数据时间范围	2007年3月5日至2012年6月21日
地理区域	SOT: 太空望远镜, 搭载在Hinode卫星上. SST: 地面望远镜, 西班牙加那利群岛拉帕尔马岛洛斯穆查乔斯山天文台 (28.45°N, 17.52°W)
空间分辨率	像元大小的两倍: 78.4 km (SOT), 87.2 km (SST)
数据量	18.0 GByte
数据格式	*.sav, *.npz, *.png, *.txt
数据库(集)访问网址	DOI: https://doi.org/10.12176/01.01.00115-V01 CSTR: https://cstr.cn/14804.11.01.01.00115-V01
基金项目	国家重点研发计划项目 (2022YFF0711402)
数据集组成	数据集共包括11628个数据文件, 其中SOT文件夹为SOT数据, 包含2007年1514帧太阳光球层水平速度场数据, 以及对应机器识别的涡流信息, 数据量12.4 GByte, SST文件夹为SST数据, 包含2012年424帧太阳光球层水平速度场数据及对应机器识别的涡流信息, 数据量5.6 GByte

2025-06-02 收到原稿, 2025-09-24 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Standard Dataset for Machine Detection of Small-scale Swirls in the Solar Photosphere

XIE Quan LIU Jiajia

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(National Key Laboratory for Deep Space Exploration, Hefei 230026)

Abstract Small-scale photospheric swirls in the photospheric quiet region are widely believed to form as a natural consequence to granular flows, and they may play a key role in transporting energy to the solar upper atmosphere. However, there are significant limitations and biases associated with the manual detection of these small-scale swirls, which may lead to an underestimation of their total number. The Swedish 1-meter Solar Telescope (SST) and Solar Optical Telescope (SOT) onboard Hinode spacecraft provide high-resolution and high-quality observations of the solar photosphere, offering sufficient data support for the study of small-scale swirls. The machine recognition of small-scale solar vortices and the extraction algorithm of key parameters has been improved, and the corresponding tool was formed. This dataset includes observations from the SOT telescope of a quiet region in the photosphere in 2007, with a pixel scale of 39.2 km and a cadence of approximately 6.4 s, as well as observations from the SST telescope of a quiet region in the photosphere in 2012, with a pixel scale of 43.6 km and a cadence of 8.25 s. This dataset plays an important role in research on the distribution of photospheric swirls in different solar regions and at different phases of the solar cycle, as well as their formation mechanisms.

Key words Solar photosphere, Small-scale swirls, Machine detection, SST, SOT

Dataset profile

Title	Standard Dataset for Machine Detection of Small-scale Swirls in the Solar Photosphere
Data Corresponding Author	LIU Jiajia (jiajiali@ustc.edu.cn)
Data Authors	XIE Quan, LIU Jiajia
Time Range	5 March 2007 to 21 June 2012
Geographical Scope	SOT is a space-based instrument onboard the Hinode spacecraft; while SST is a ground-based instrument located at the Roque de los Muchachos Observatory, La Palma, Canary Islands, Spain (28.45°N, 17.52°W)
Spatial Resolution	Twice of the pixel sizes: 78.4 km (SOT), 87.2 km (SST)
Data Volume	18.0 GByte
Data Format	*.sav, *.npz, *.png, *.txt
Database/Dataset URL	DOI: https://doi.org/10.12176/01.01.00115-V01 CSTR: https://cstr.cn/14804.11.01.01.00115-V01
Foundation Item	National Key R&D Program of China (2022YFF0711402)
Dataset Composition	The dataset contains a total of 11628 data files, including: The SOT folder, which contains 1514 frames of SOT photospheric horizontal velocity fields in 2007 and the corresponding machine-detected swirl information, with a total data volume of 12.4 GByte; The SST folder, which contains 424 frames of SST photospheric horizontal velocity fields in 2012 and the corresponding machine-detected swirl information, with a total data volume of 5.6 GByte

0 引言

迄今为止,不同尺度的旋转运动已经在太阳大气不同高度被观测到.例如,大尺度的黑子旋转、龙卷风^[1]、色球涡流以及小尺度的光球涡流^[2]等.这些旋转运动在太阳高层大气加热方面可能发挥着重要的作用.例如,相关观测研究发现大量阿尔芬波或阿尔芬脉冲会被光球涡流激发,并运输到色球层,从而加热局部色球^[3].

不同于尺度较大的太阳龙卷风,小尺度的光球涡流很难被人为识别,需要依靠自动识别方法.本研究开发了一种太阳小尺度涡流机器识别(ASDA)及关键参数提取工具软件^[4],利用自动涡流识别算法从速度场文件计算得到每个点的 Γ_1 和 Γ_2 值,对应公式如下:

$$\Gamma_1(P) = \hat{z} \cdot \frac{1}{N} \sum_S \frac{\mathbf{n}_{PM} \times \mathbf{v}_M}{|\mathbf{v}_M|},$$

$$\Gamma_2(P) = \hat{z} \cdot \frac{1}{N} \sum_S \frac{\mathbf{n}_{PM} \times (\mathbf{v}_M - \bar{\mathbf{v}})}{|\mathbf{v}_M - \bar{\mathbf{v}}|}.$$

其中, S 表示一个包含目标点 P 的二维区域,该区域共有 N 个像素; M 为区域 S 中的任意一点; $\hat{z}$ 表示垂直于观测面的单位法向量,指向观测者方向; $\mathbf{n}_{PM}$ 是从点 P 指向点 M 的单位径向向量;变量 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示区域 S 内的平均速度矢量; $\mathbf{v}_M$ 表示点 M 处的速度矢量;符号“ $\times$ ”和“ $|\cdot|$ ”分别表示向量的叉乘和向量的模(即大小).进而根据 Γ_1 绝对值大于0.89以及 Γ_2 绝对值大于 $2/\pi$ 分别得到涡流的中心和边界,从而识别出小尺度涡流,并给出涡流的位置、等效半径、旋转速度等关键参数.

速度场的估计则依赖于望远镜观测的光球数据.目前,中国和国际上已有多台空间和地面望远镜在对太阳不同高度使用不同谱线进行成像观测,包括NVST, SST, SOT, SDO, DKIST等.其中, SST和SOT部分时段的光球层数据已被用于ASDA的测试,并得到了识别出的涡流相关参数.

SOT (Solar Optical Telescope, 太阳光学望远镜)^[5]是一台高分辨率的空间太阳望远镜,搭载于日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)主导的Hinode卫星^[6]上,于2006年由日本鹿儿岛的内之浦宇宙空间观测所发射升空.该望远镜主要用于对太阳光球和色球层进行高精度成像观测,结合磁场测量数据,研究

太阳活动与太阳大气中磁场的精细结构演化.作为太空望远镜, SOT避免了地球大气扰动的影响,可实现极高的空间分辨率和长时间稳定观测,是研究太阳小尺度结构(例如喷流、涡流等)的重要工具.

SST (Swedish 1-meter Solar Telescope, 瑞典1 m望远镜)^[7]是一台地面太阳望远镜,由瑞典皇家科学院空间物理研究所建造并运行,位于西班牙加那利群岛拉帕尔马岛的洛斯穆查乔斯山天文台(Roque de los Muchachos Observatory),地理坐标约为28.45°N, 17.52°W,海拔约2400 m.该台址具有极佳的视宁度和大气透明度,非常适合高分辨率太阳观测. SST口径为1 m,是目前世界上成像质量最优秀的地面太阳望远镜之一,配备多通道成像仪器和自适应光学系统,广泛用于太阳光球和色球层小尺度活动的观测与研究.

1 数据采集与处理方法

1.1 数据采集方法

SOT (太阳光学望远镜)主要由两部分组成:一个口径为50 cm的主望远镜(即光学望远镜组件, Optical Telescope Assembly, OTA)和焦平面组件(Focal Plane Package, FPP),其结构布局如图1所示. SOT的FPP包含三个CCD相机,分别为滤波成像仪(Filtergraph, FG)、光谱偏振仪(Spectro-polarimeter)以及相关跟踪器(Correlation Tracker, CT). OTA中的宽带滤光成像仪(Broadband Filter Imager)可以在波长范围为388~668 nm的六个波段上获取光度图像,具有高达约0.054"的像素分辨率,并能以小于10 s的时间间隔快速成像.这些图像的获取过程在极其稳定的条件下进行(稳定性要求为三倍标准差小于0.09"),这种高稳定性通过结构与主动图像稳定系统相结合实现.图像稳定系统包括安装于OTA中的压电驱动倾斜反射镜(CTM),该系统通过闭环伺服控制机制,根据太阳颗粒结构的相关跟踪结果估算图像偏移,从而校正图像抖动(该跟踪系统即相关跟踪器, CT).这套系统可最大限度地减少太阳图像在焦平面CCD上的抖动.

SST (瑞典1 m望远镜)的前置透镜直径接近1 m,是欧洲现役最大的光学太阳望远镜,原理如图2所示,其位于世界公认的最佳太阳观测台址之一——洛斯穆查乔斯天文台,能够观测到太阳表面精细至约

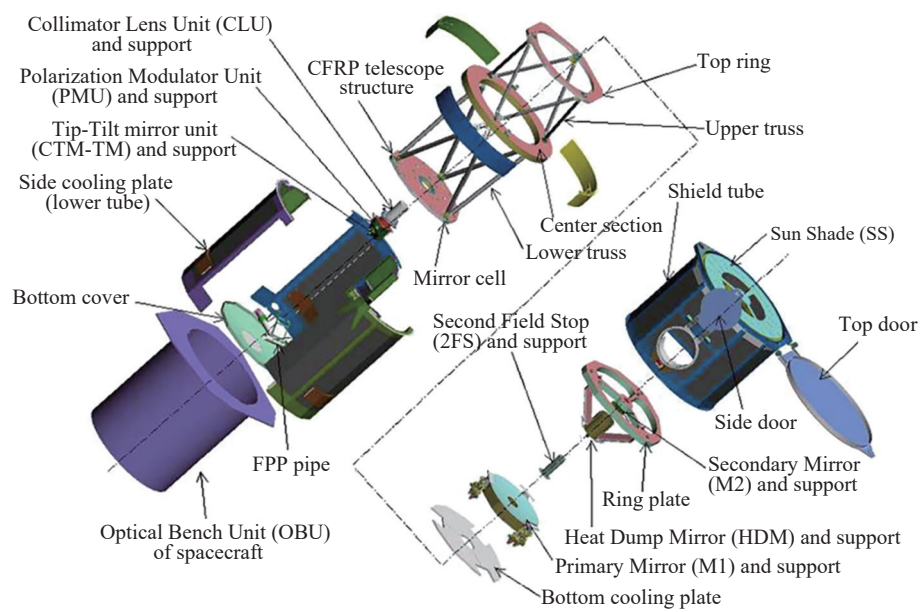


图 1 SOT 主望远镜 OTA 组件结构布局^[5]

Fig. 1 Structural layout of the OTA components of the SOT main telescope^[5]

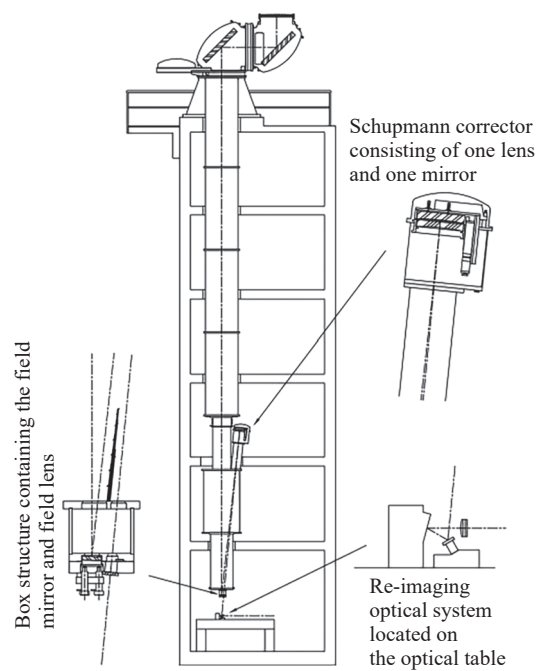


图 2 SST 观测塔结构剖面^[7]

Fig. 2 Structure of SST observation tower^[7]

70 km 的精细结构. 为了实现这一点, SST 配备了自适应反射镜系统, 以每秒 1000 次的频率修正地球大气引起的图像模糊. SST 也是首个专为自适应光学设计的太阳望远镜. SST 配备了诸如 CRISP 成像光谱偏振仪等开创性的观测设备. CRISP 是一种多功能

的可调滤光仪, 能够在电磁波谱红色部分进行快速光谱成像. CHROMIS 仪器是 CRISP 在短波段的补充, 自 2017 年起投入使用. CHROMIS 可在蓝光和紫光波段 (包括 Ca H 和 K 线) 进行衍射极限的光谱成像, 这意味着其空间分辨率可低于 100 km, 为研究色球层加热过程在最小可分辨尺度上的表现提供了窗口.

1.2 数据预处理

在数据采集后, SOT 和 SST 均需要进行一系列预处理流程, 以消除观测过程中的干扰, 并提高数据精度. 两者由于观测环境不同 (空间与地面) 和仪器系统差异, 其预处理方法也略有不同.

SOT 首先对采集到的 Level 0 数据进行去除坏像素、去除暗电流、平场校正等操作得到 Level 1 数据. 然后依据自带的压电驱动倾斜反射镜 (CTM) 和相关跟踪器 (CT) 进行图像稳定性处理. 最后, 数据会进行格式标准化, 转化为 FITS 格式, 并附带完整的元数据, 其中头文件中记录时间、位置、观测波段等信息.

SST 的基础校正包括暗场/平场校正、相机偏差去除以及坏像素的去除, 然后进行图像配准、抖动校正以及图像重建, 最后以标准 FITS 文件进行保存.

应用 FLCT^[8,9] 方法从处理好的光球层观测数据中提取光球层水平速度场. FLCT (Fourier Local Correlation Tracking) 是一种基于局部互相关的速度

场估计方法,用于推测两帧连续图像之间的局部运动,已广泛应用于太阳物理学中观测和研究太阳活动区、光球米粒组织和磁场漂移等现象.具体而言,在本研究中,将某一帧及其下一帧的光球层观测数据输入 FLCT 函数,即可得到该帧估算的水平速度场.通过将 FLCT 应用于 SOT 和 SST 的光球层观测数据,这里估算了 SOT 和 SST 每一帧观测视场的水平速度场,并以 npz 格式进行保存.

2 数据样本描述

数据集主要包括两部分.一部分为 SOT,于 2007 年 3 月 5 日 05:48:03—08:29:52 UT 观测的共 1515 帧光球层图像数据,利用 FLCT 估算的 1514 帧速度场信息和 ASDA 识别到的每一帧中的涡流信息.

另一部分则为 SST,于 2012 年 6 月 21 日 08:07:24—09:05:37 UT 观测的共 425 帧图像数据,利用 FLCT 估算的 424 帧速度场信息以及识别的涡流信息.两部分数据构成类似,下面以 SOT 的图像数据对应的太阳光球层水平速度场和涡流信息相关的数据文件为例,介绍相应的数据文件样本.

光球层水平速度场以及对应的涡流信息等保存在同一个文件夹中,文件夹名为如 20070305_054803,以观测时间进行命名.每个文件夹包含 5 个文件,分别为 gamma.npz (Γ_1, Γ_2 ^[10] 参数的信息); velocity.npz (速度场信息,见图 3); vortex.npz (该帧识别到的所有涡流的信息); vortex.png (涡流的位置以及对应的速度场的背景分布,见图 4); vortex.txt (该帧识别的所有涡流的信息,见图 5).

```
vx:
[[ 0.19986409  0.20243834  0.20450588 ...  0.00753825  0.00066451
  -0.00440233]
 [ 0.20774335  0.21032828  0.21234152 ...  0.00715274  0.00079835
  -0.00391474]
 [ 0.21371399  0.21632156  0.21828313 ...  0.00729694  0.0014425
  -0.00293129]
 ...
 [-0.00373525 -0.00580371 -0.00831595 ...  0.02728235  0.03083314
   0.03393783]
 [-0.00212926 -0.00392453 -0.00612387 ...  0.03325001  0.03745328
   0.04108519]
 [-0.00078284 -0.00232766 -0.00423896 ...  0.03868933  0.04354243
   0.04770685]]
vy:
[[-0.00931004 -0.00327742  0.00297351 ...  0.02821185  0.03581511
   0.04444794]
 [-0.00307831  0.00305044  0.0093526 ...  0.02453416  0.03213137
   0.04071557]
 [ 0.00430689  0.01040128  0.01661062 ...  0.02032698  0.02786565
   0.03632516]
 ...
 [-0.02286694 -0.02150593 -0.02001211 ... -0.01802189 -0.02001777
  -0.02192071]
 [-0.02057853 -0.01947452 -0.01825734 ... -0.01910665 -0.02080792
  -0.02236525]
 [-0.01870385 -0.01781156 -0.01682303 ... -0.01992108 -0.02143233
  -0.02276837]]
t:
b'2007-03-05T05:48:03.555'
```

图 3 数据集速度场文件样例

Fig. 3 Example of a velocity field file dataset product

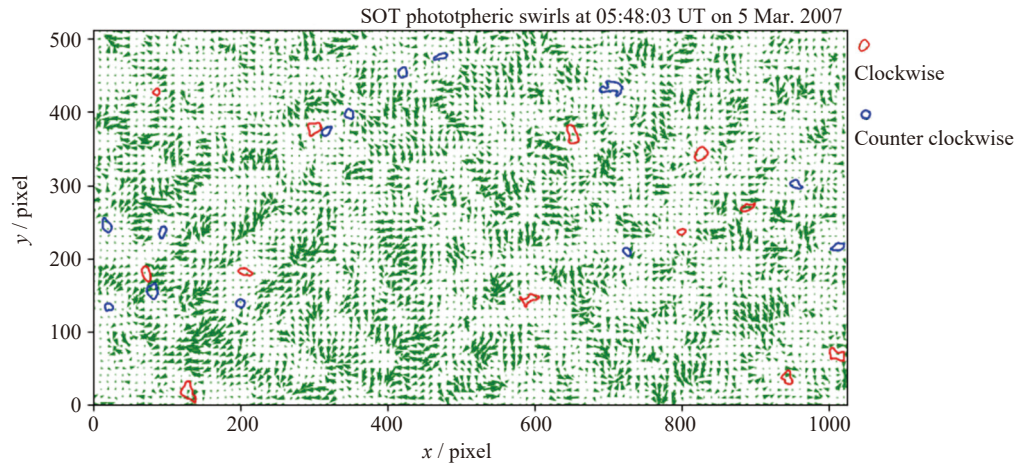


图 4 数据集涡流位置分布样例. 图像中心对应于太阳日面位置 $x_c=5.3''$, $y_c=4.1''$. 整个视场区域对应日面区域 $x=[-22.7'', 33.3'']$, $y=[-9.9'', 15.1'']$

Fig. 4 Example showing the distribution of vortex positions. The image center is located at $(x_c=5.3'', y_c=4.1'')$ on the solar disk, and the field of view covers the region $x=[-22.7'', 33.3'']$, $y=[-9.9'', 15.1'']$

Swirl detecton results using ASDA (<https://github.com/PyDL/ASDA>)
The following describe some key parameters of all swirls detected in the given velocity field

Explanation of parameters:
no: event number
xc: horizontal location of swirl center, in units of pixel
yc: vertical location of swirl center, in units of pixel
re: effective radius of swirl, in units of pixel
vcx: horizontal velocity of swirl center
vcy: vertical velocity of swirl center
vr: rotating velocity of swirl, positive for counterclockwise rotation
ve: expanding/shrinking speed of swirl, positive for expansion

no	xc	yc	re	vcx	vcy	vr	ve
0	70.0	180.0	8.00	0.00	-0.01	-0.18	0.02
1	87.0	430.0	4.79	0.00	-0.01	-0.06	0.02
2	127.0	22.0	10.40	-0.00	-0.01	-0.15	-0.00
3	201.0	184.0	6.89	0.00	-0.00	-0.06	-0.02
4	298.0	377.0	8.88	-0.00	-0.01	-0.10	0.01
5	589.0	141.0	8.00	0.00	0.00	-0.07	0.01
6	652.0	364.0	9.77	-0.01	0.00	-0.17	-0.01
7	802.0	236.0	4.98	-0.00	-0.00	-0.05	0.01
8	827.0	345.0	8.96	-0.00	0.00	-0.10	0.02
9	887.0	266.0	6.70	-0.00	-0.01	-0.14	-0.00
10	948.0	32.0	7.80	-0.00	0.00	-0.11	-0.06
11	1005.0	69.0	8.88	0.00	0.01	-0.09	0.07
12	19.0	243.0	7.63	0.00	0.01	0.11	0.00
13	21.0	135.0	5.73	-0.00	-0.01	0.05	-0.00
14	83.0	149.0	8.76	0.01	-0.01	0.15	-0.03
15	93.0	236.0	6.38	0.01	-0.01	0.07	-0.00
16	197.0	140.0	6.10	-0.00	-0.00	0.07	-0.01
17	317.0	372.0	6.23	-0.01	0.02	0.10	-0.03
18	348.0	398.0	6.51	0.00	-0.00	0.12	0.03
19	421.0	455.0	6.79	0.00	0.00	0.08	0.00
20	472.0	476.0	6.10	0.00	-0.00	0.05	-0.02
21	710.0	435.0	10.67	0.00	0.00	0.10	-0.01
22	723.0	213.0	5.47	0.00	-0.00	0.11	-0.03
23	953.0	303.0	6.65	-0.00	-0.00	0.03	0.01
24	1012.0	217.0	6.77	-0.00	0.00	0.08	0.01

图 5 数据集涡流信息文件样例

Fig. 5 Example of a vortex information file from the dataset

3 数据质量控制与评估

由于 SOT 和 SST 已经运行观测多年, 相关图像处理方法已经较为成熟, 结合部分观测数据的检查, 发现并无损坏图像. 同时将观测数据与对应高度数值模拟的数据进行对比, 二者表现出高度相似性. 该观测数据也得到国际上的认可, 并开展了相关研究. 因此, 该数据集中的观测数据质量较好, 可直接使用. 由于观测数据不可避免地存在部分噪声, Xie 等^[11]使用人工生成的包含噪声的速度场数据应用于 ASDA, 测试 ASDA 在含噪声数据上的表现. 结果表明, 在常见观测数据的噪声水平下, ASDA 依然保持着较高的识别准确率 ($> 85\%$), 满足设定指标. 同时 ASDA 从模拟数据中识别的涡流信息也与本数据集中的涡流信息相近, 表明该数据集中的涡流信息是可信的. 总体而言, 本数据集中包含的原始观测数据、估算的速度场数据以及相应识别的涡流信息数据均已被严格检验,

质量均达到标准, 可信度可以达到科学研究的要求.

4 数据使用方法与建议

本数据集可以开展太阳小尺度涡流的识别以及相关特性的研究. 相关数据可以使用 Python 语言读取.

读取 velocity.npz 文件可以获得每一帧观测图像的光球层水平速度场分布, 用于进行光球层速度场的演化以及米粒组织动力学分析. 速度场 x 方向分量 v_x 和 y 方向分量 v_y 的单位均是 $\text{pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$, 使用如下代码

```
import numpy as np
file_path = "velocity.npz"
data = np.load(file_path)
print('vx:', data['vx'])
print('vy:', data['vy'])
print('time:', data['t'])
```

```
vx: [[ 0.19986409  0.20774335  0.21371399 ... -0.00373525 -0.00212926
      -0.00078284]
      [ 0.20243834  0.21032828  0.21632156 ... -0.00580371 -0.00392453
      -0.00232766]
      [ 0.20450588  0.21234152  0.21828313 ... -0.00831595 -0.00612387
      -0.00423896]
      ...
      [ 0.00753825  0.00715274  0.00729694 ...  0.02728235  0.03325001
      0.03868933]
      [ 0.00066451  0.00079835  0.0014425 ...  0.03083314  0.03745328
      0.04354243]
      [-0.00440233 -0.00391474 -0.00293129 ...  0.03393783  0.04108519
      0.04770685]]
vy: [[-0.00931004 -0.00307831  0.00430689 ... -0.02286694 -0.02057853
      -0.01870385]
      [-0.00327742  0.00305044  0.01040128 ... -0.02150593 -0.01947452
      -0.01781156]
      [ 0.00297351  0.0093526   0.01661062 ... -0.02001211 -0.01825734
      -0.01682303]
      ...
      [ 0.02821185  0.02453416  0.02032698 ... -0.01802189 -0.01910665
      -0.01992108]
      [ 0.03581511  0.03213137  0.02786565 ... -0.02001777 -0.02080792
      -0.02143233]
      [ 0.04444794  0.04071557  0.03632516 ... -0.02192071 -0.02236525
      -0.02276837]]
time: 2007-03-05T05:48:03.555
```

图 6 数据集速度场文件 velocity.npz 样例

Fig. 6 Example of the dataset velocity field file velocity.npz

```

center:
( 70, 180)( 87, 430)( 127, 22)( 201, 184)( 298, 377)
( 802, 236)( 827, 345)( 887, 266)( 948, 32)(1005, 69)
( 83, 149)( 93, 236)( 197, 140)( 317, 372)( 348, 398)
( 710, 435)( 723, 213)( 953, 303)(1012, 217)
re:
7.9987684.78730710.4031426.8868128.884866
4.9827878.9562326.6993807.7972558.884866
8.7585786.3830766.1026436.2316786.506552
10.6749685.4700216.6516976.770275
vc:
(0.000732,-0.014713)(0.003454,-0.007529)(-0.001747,-0.011864)(0.000685,-0.004008)(-0.003153,-0.008576)
(-0.002752,-0.001413)(-0.003218,0.000663)(-0.003109,-0.010290)(-0.001243,0.001137)(0.001892,0.007052)
(0.007378,-0.005971)(0.010708,-0.010894)(-0.000202,-0.001953)(-0.007679,0.023015)(0.001859,-0.002574)
(0.000196,0.001095)(0.004251,-0.002581)(-0.001982,-0.000077)(-0.003127,0.000747)
vr:
-0.183057-0.056950-0.153090-0.059606-0.097705
-0.054472-0.098049-0.140221-0.111283-0.094957
0.1491260.0719640.0658190.1026750.123322
0.0991020.1110820.0346640.080665
ve:
0.0221990.015164-0.000980-0.0155470.007229
0.0103860.023122-0.002132-0.0632090.073848
-0.027417-0.004615-0.005870-0.0251700.026189
-0.009465-0.0348820.0066970.010524

```

图 7 数据集涡流信息文件 vortex.npz 样例

Fig. 7 Example of the dataset vortex information file vortex.npz

即可读取如图 6 所示的这一帧图像 v_x 与 v_y 信息以及这一帧图像的观测时间.

vortex.npz 及 vortex.txt 文件提供了每一帧光球层观测视场中的涡流分布位置以及相应的涡流信息. 通过对这些涡流信息进行相关的统计分析, 可以得到光球层不同区域涡流的特征分布, 例如速度分布、空间分布等^[12]. 对比涡流在不同区域的分布特性有助于理解涡流在不同区域的形成机理. vortex.png 则从视觉上提供涡流位置分布以及背景速度场信息, 便于更清晰直观地理解涡流的具体含义. 涡流中心的横向坐标 x_c 、纵向坐标 y_c 和涡流的有效半径 r_e 的单位均为 pixel, 涡流中心的横向速度 v_{cx} 、纵向速度 v_{cy} 以及涡流的旋转速度 v_r 和扩张/收缩速度 v_e 的单位则均为 $\text{pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$. 使用以下代码

```

import numpy as np
file_path = "vortex.npz"
data = np.load(file_path)
print('center:', data['center'])
print('re:', data['radius'])
print('vc:', data['vc'])
print('vr:', data['vr'])

```

```
print('ve', data['ve'])
```

即可得到如图 7 所示的该帧所有识别的涡流相关信息.

使用太阳小尺度涡流机器识别及关键参数提取算法, 可以十分简便地构建其他观测数据的太阳小尺度涡流数据集. 这些数据集对推动太阳小尺度的研究发展起到了重要作用. 例如, 通过同时的光球层和色球层涡流相关性研究, 发现了阿尔芬波从太阳低层大气传播到高层大气的证据, 为日冕加热这一难题研究提供了新的思路^[3]; 使用类似小尺度涡流数据集, 研究发现了光球层和色球层涡流均存在类似于太阳 p 模 5 min 振荡的周期性^[4], 并且发现了光球层涡流, 相比分布于米粒组织的通道, 可能存在分布于中米粒组织通道这一更大尺度的可能性^[12]. 这些研究均为太阳小尺度涡流的激发机制的研究起到了重要的推动作用.

参考文献

- [1] WEDEMEYER-BÖHM S, SCULLION E, STEINER O, *et al.* Magnetic tornadoes as energy channels into the solar corona[J]. *Nature*, 2012, **486**(7404): 505-508

- [2] WANG Y, NOYES R W, TARBELL T D, *et al.* Vorticity and divergence in the solar photosphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 1995, **447**: 419
- [3] LIU J, NELSON C J, SNOW B, *et al.* Evidence of ubiquitous Alfvén pulses transporting energy from the photosphere to the upper chromosphere[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 3504
- [4] LIU J, JESS D, ERDÉLYI R, *et al.* Five-minute oscillations of photospheric and chromospheric swirls[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **674**: A142
- [5] SUEMATSU Y, TSUNETTA S, ICHIMOTO K, *et al.* The solar optical telescope of solar-B (Hinode): The Optical Telescope Assembly[J]. *Solar Physics*, 2008, **249**(2): 197-220
- [6] KOSUGI T, MATSUZAKI K, SAKAO T, *et al.* The Hinode (solar-B) mission: an overview[J]. *Solar Physics*, 2007, **243**(1): 3-17
- [7] SCHARMER G B, BJELKSJO K, KORHONEN T K, *et al.* The 1-meter Swedish solar telescope[C]//Proceedings of SPIE 4853, Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. Waikoloa: SPIE, 2003: 341-350. DOI: [10.1117/12.460377](https://doi.org/10.1117/12.460377)
- [8] WELSCH B T, FISHER G H, ABBETT W P, *et al.* ILCT: recovering photospheric velocities from magnetograms by combining the induction equation with local correlation tracking[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **610**(2): 1148-1156
- [9] FISHER G H, WELSCH B T. FLCT: a fast, efficient method for performing local correlation tracking[C]//Sub-surface and Atmospheric Influences on Solar Activity. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2008: 373-380
- [10] GRAFTIEAUX L, MICHARD M, GROSJEAN N. Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(9): 1422-1429
- [11] XIE Q, LIU J, ERDÉLYI R, *et al.* Improving the Γ -functions method for vortex identification[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **700**: A6
- [12] XIE Q, LIU J, ERDÉLYI R, *et al.* Photospheric swirls in a quiet-sun region[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **979**(1): 27

作者简介



谢 权 (第一作者) 男, 2002 年 8 月出生于湖北省鄂州市, 现为中国科学技术大学地球和空间科学学院在读博士研究生, 主要研究方向为太阳小尺度涡流识别、数据分析以及检测方法改进。
E-mail: xq30@mail.ustc.edu.cn



刘佳佳 (通信作者) 男, 1988 年 12 月出生于安徽省淮北市, 现为中国科学技术大学地球和空间科学学院教授, 主要研究方向为太阳多尺度爆发活动的原理及其空间天气和行星环境效应。
E-mail: jjajiali@ustc.edu.cn