

基于空时显著性的日冕物质抛射检测*

杨志鹏¹ 尚振宏^{1†} 强振平² 辛泽寰¹ 冼祥贵¹ 夏国强¹

(1 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500)

(2 西南林业大学数据与智能工程学院 昆明 650224)

摘要 日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)是一种剧烈的太阳爆发现象, 它会对行星际空间造成严重扰动, 进而影响人类生产、生活. 基于CME的时空显著性, 将显著性检测方法引入到CME检测中, 利用结构化矩阵分解SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)的大角度光谱日冕仪(Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment, LASCO) C2的日冕图像对应的特征矩阵, 从中恢复出稀疏部分获得显著前景. 然后考虑CME运动时产生的时间显著性, 从而去除非CME结构(如冕流), 得到最终检测结果. 实验表明, 以人工目录协调数据分析中心(Coordinated Data Analysis Workshop, CDAW)检测结果为基准时, 所提方法不仅在检测CME数量上比计算机辅助跟踪软件包(Computer Aided CME Tracking Software package, CACTus)和太阳爆发事件检测系统(Solar Eruptive Event Detection System, SEEDS)有优势, 还在CME中心角度和张角宽度等特征物理参数测量上比CACTus和SEEDS更接近CDAW目录参考值.

关键词 太阳: 日冕物质抛射, 技术: 图像处理, 方法: 空时显著性融合

中图分类号: P182; **文献标识码:** A

1 引言

日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)是太阳在几分钟至几小时内向行星际空间释放能量的一种大尺度爆发现象, 是空间灾害天气的主要驱动力. CME引起的强电磁辐射和高能粒子将对地球磁场、电离层、等离子体层和高层大气产生严重的扰动, 如太阳高能粒子爆发引起的卫星通讯系统中断、地面卫星导航失灵、地面电力设施故障等^[1]. 因此, CME检测成为空间天气预测的一项重要研究内容. 为探究CME形成、传播等机理, 欧美国家先后发射太阳和日球层天文台(Solar and Heliospheric Observatory, SOHO)^[2]、日地关系天文台(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO)^[3]等搭载日冕仪的卫星对CME进行长期观测. 未来, 我国首颗专用太阳观测卫星先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)^[4-5]将发射升空, 实现我国太阳卫星探测零的突破, 进一步揭示太阳磁场、耀斑和CME的形成机制及相互关系.

2021-01-25收到原稿, 2021-06-08收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12063002、12163004)资助

†szh@kust.edu.cn

国内外现有的CME检测方法可分为两大类:一类是基于人工手动标识检测方法,如协调数据分析中心(Coordinated Data Analysis Workshop, CDAW)^[6]和美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL¹)目录, CDAW和NRL均是由观测者对日冕仪拍摄的日冕图像进行处理,通过人工手动标识,编制成CME目录.人工手动标识检测方法主要依靠研究人员每日手工记录CME信息,该类方法易受观测人员主观影响且工作量繁多耗时.另一类方法主要基于计算机自动处理,该类方法在一定程度上能够降低部分人工主观因素的影响,同时还能节约人力资源成本.因此,利用计算机自动处理的方法逐渐成为日冕物质抛射检测的重要手段.

基于计算机自动处理方法大致可以分为以下4类^[7]:基于灰度特征的方法、基于纹理特征的方法、基于光流法和基于学习的方法.2004年Robbrecht等^[8]首次提出计算机自动检测方法—计算机辅助跟踪软件包(Computer Aided CME Tracking Software package, CACTus),该方法利用CME爆发时的物理参数组成特殊数据结构体,通过使用霍夫变换完成CME检测;2006年Qu等^[9]使用传统形态学和变化阈值的方法在直角坐标系下探测CME;Colaninno等^[10]运用光流法实现对CME的检测和跟踪;2008年Olmedo等^[11]提出太阳爆发事件检测系统(Solar Eruptive Event Detection System, SEEDS),该系统利用图像分割技术在极坐标中实现CME检测;2009年Boursier等^[12]提出(Automatic Recognition of Transient Events and Marseille from Synoptic maps, ARTEMIS)方法,该方法将SOHO上搭载的大角度光谱日冕仪(Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment, LASCO) C2日冕图像变换到综合图(Synoptic Maps),从综合图中利用垂直条纹检测CME;2010年Goussies等^[13]提出一种基于灰度共生矩阵的非参数监督的CME分割方法(CORonal Segmentation Technique, CORSET).随后,又出现一些新的CME检测方法,如基于水平集和竞争区域的方法^[14]、转换到频域处理的方法^[15]、混合高斯法^[16]、基于自适应提升(Adaptive Boosting, AdaBoost)的分类算法^[17-18]、基于极限学习机的方法^[19]、基于卷积神经网络的分类方法^[20-22]以及自适应背景学习方法^[23]等.

上述基于计算机自动处理的方法或多或少存在一定问题.譬如,基于灰度特征的方法CACTus和SEEDS等都采用亮度增强的方式来突出日冕图像中疑似CME区域,既增强CME目标区域,也增强非CME区域的强度,且因算法预设的检测规则、阈值选取不同等因素,导致两种方法在检测效果上存在较大差异;光流算法^[10]可以从日冕图像序列中估计出像素的速度矢量,形成图像矢量运动场,能确定运动明显的像素区域,但对于运动变化程度较弱的CME,其检测跟踪效果较差.此外,光流法计算复杂,耗时较长,无法满足实时检测需求;基于学习的检测方法目前有端到端检测^[1]、集成学习^[18]、卷积神经网络^[20-22]等,该类方法主要采用有监督的方式学习CME特征,因此需要大量人工标注的日冕图像数据集,而大量人工标注的日冕图像数据集不可避免地掺入人工主观因素,导致基于有监督的方式缺乏一定的客观性,致使检测结果与真实情况出现偏差.

CME有多种形态和尺度特征,通常表现为明亮、向外扩散运动、纹理复杂的增强结构^[24].在图像空间上,CME相对日冕图像中的背景呈现明亮、纹理复杂的结构,具有空间显著性.此外,在时间维度上,CME呈现出向外扩散的运动状态,具有时间显著性.

¹NRL: <http://lasco-www.nrl.navy.mil/index.php?p=content/cmelist>

针对上述特点, 本文将显著性检测方法引入到CME检测中, 提出一种结合空时显著特性的日冕物质抛射检测方法. 在空间维度上, 采用基于结构化矩阵分解模型的显著性目标检测方法, 对单幅日冕图像进行空间显著特征提取, 得到日冕图像的空间显著图; 在时间维度上, 利用三帧差分法获取时间显著性; 最后根据CME的运动特性, 将时间、空间显著性进行融合, 检测出日冕物质抛射. 本文方法流程如图1所示. 本文方法主要有以下特点: (1)利用CME的时空显著性, 能够检测到人工目录CDAW中遗漏的CME, 检测数量有优势; (2)对CME的时间信息加以利用, 能较好地排除冕流等干扰, 检测准确度有提高; (3)采用无监督方式, 无需标注数据集, 节约人力资源成本.

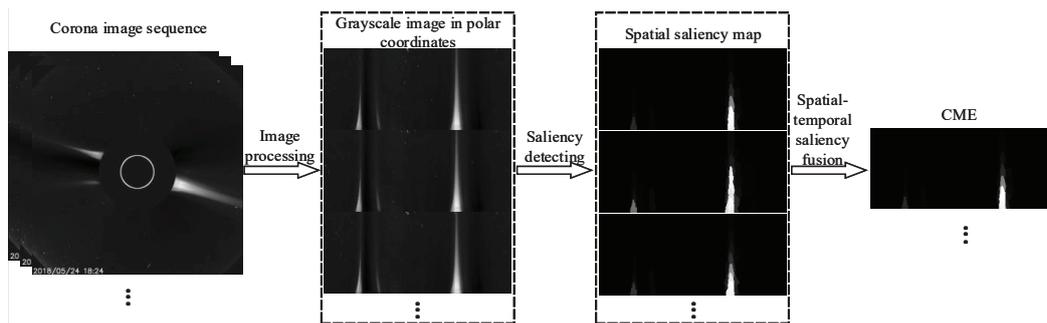


图1 本文方法流程图

Fig.1 Flow chart of the method in this paper

2 基于空时显著性的日冕物质抛射检测

2.1 日冕图像数据处理

本文选取LASCO C2视场的 512×512 像素图像作为实验数据. LASCO C2日冕图像时间分辨率为12 min, 由于SOHO卫星搭载的LASCO日冕仪在成像时会受到彗星、卫星等遮挡干扰, 故人工剔除部分日冕仪拍摄效果不佳的图像. LASCO C2图像的观测范围是 $2.3\text{--}6.5R$ (R 为太阳半径). 由于在不同太阳活动周期内太阳背景亮度有所差别, 我们选取两组不同时段产生的日冕图像序列作为实验数据, 第I组处于第24太阳周的上升期, 其时间为: 2014-01-18UT00:00—2014-01-25UT22:00, 第II组处于第24太阳周下降期, 其时间为: 2018-05-15UT00:00—2018-05-31UT22:00, 其中UT为世界时.

由于太阳是一种圆对称结构, CME喷发过程及冕流的运动沿径向向外移动, 为便于分析和计算, 本文将实验数据由笛卡尔坐标系转换到极坐标系, 以日冕图像北极为零度起点, 逆时针旋转得到极坐标图, 并裁剪掉日冕图像中心挡板部分. 如图2所示, 图2(左)为原始LASCO C2日冕图像, 图2(右)为经过预处理、极坐标转化, 裁剪得到的极坐标系下的日冕图像.

2.2 空间显著性检测

基于矩阵分解的显著性检测算法, 认为图像背景是高度相关的, 可被低秩矩阵表示, 而显著区域则是特殊且相关性较弱的区域, 可被稀疏矩阵表示^[25]. 一幅日冕图像对应的特征矩阵可以认为是由一个低秩矩阵与一个稀疏矩阵以和的形式组合而成, 两个矩阵分

别对应着非显著部分(日冕图像背景区域)和显著部分(CME区域以及可能存在的冕流区域). 从而将日冕图像空间显著性检测问题转化为从日冕图像的特征矩阵中求解出一个低秩矩阵和一个稀疏矩阵.

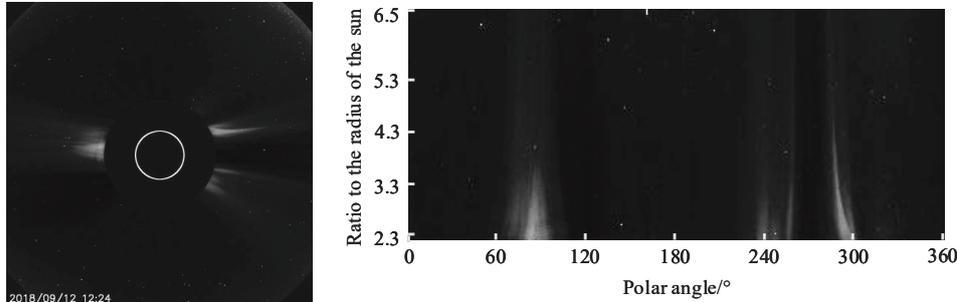


图 2 LASCO C2日冕图像(左)及对应的极坐标图像(右)示例

Fig. 2 Examples of LASCO C2 corona image (left) and corresponding polar coordinate image (right)

在众多矩阵分解方法中, 结构化矩阵分解模型(Structured Matrix Decomposition, SMD)^[26]使用树形结构约束稀疏元素, 引入拉普拉斯正则项增大背景与前景之间的差异, 使得显著目标与背景更容易区分. 其核心思想如下. 设日冕图像 P 的观测矩阵为 F , 则该观测矩阵 F 可由低秩矩阵 L 和稀疏矩阵 S 构成. 首先对日冕图像 P 进行特征提取, 获得相应的纹理、灰度、边缘特征等, 经过简单线性迭代聚类算法(Simple Linear Iterative Clustering, SLIC)^[27]分割后得到超像素块 p_i , i 为超像素块的编号. 结合位置、灰度、背景等高层先验知识^[28]构建索引树, 对SMD模型进行求解, 最后进行显著性估计得到显著图. 其中, SMD模型如(1)式所示:

$$\begin{cases} \min_{L, S} \Psi(L) + \alpha\Omega(S) + \beta\Theta(L, S), \\ \text{s.t. } F = L + S, \end{cases} \quad (1)$$

这里, $\Psi(L)$ 表示低秩约束项, 用以识别冗余背景块的固有特征子空间, $\Omega(S)$ 表示树形结构稀疏约束项, 主要作用是从稀疏矩阵中捕捉补丁块的空间与特征关系, $\Theta(L, S)$ 表示交互正则项, 用来扩大低秩矩阵 L 和稀疏矩阵 S 所诱导的子空间之间的距离, α 、 β 为权衡参数. 利用交替方向法(Alternating Direction Method, ADM)^[29]对(1)式求解, 得到观测矩阵 F 对应的最优解 L 和 S . 图3为使用SMD算法进行CME空间显著图求解的流程图.

2.3 融合空时显著性

冕流是日冕图像中的一种具有较亮视觉特征、低速运动特性、相对稳定的结构, 在空间显著性方面与CME相似. 由于空间显著图中可能存在冕流等干扰, 因此通过SMD算法计算出CME的空间显著性得到空间显著图后, 仍无法较为准确地确定日冕图像中是否存在CME. 如图4所示, 图4(左)为2018-03-25UT17:48的日冕图, 图4(右)为对应的空间显著图, 白框中部分即为冕流, 而非CME.

由于CME是一种动态爆发现象, 具有运动目标的“运动属性”, 从时间角度分析可知其具有一定的运动连续性, 即存在时间显著性. 研究人员通过对大量的日冕图像序列进

行持续性观测, 认为冕流等类似太阳爆发结构体在日冕图像中通常保持相对静止或者运动特性极不明显^[7, 30].

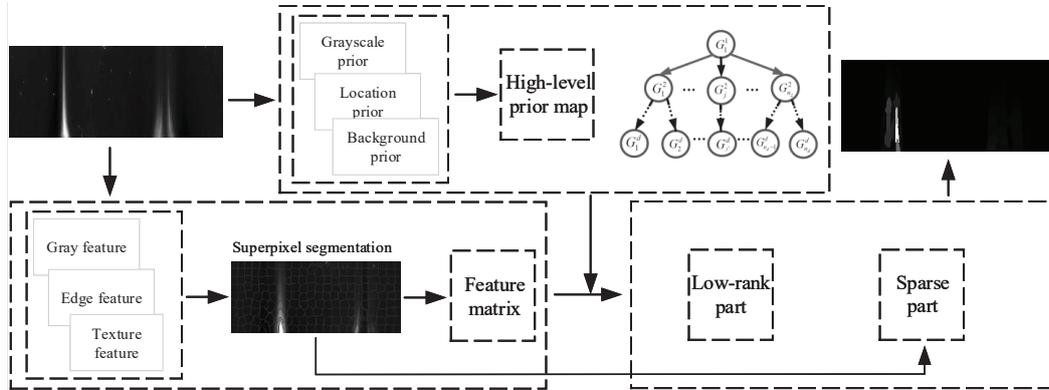


图3 使用SMD算法求解CME空间显著图流程图。图中树形结构中为索引树, 节点 G 表示由图像分割得到的图像块, d 表示索引树的深度, j 表示当前层第 j 个节点, n_d 表示当前层的节点总数。

Fig. 3 The flow chart of solving the CME space saliency map with the SMD algorithm. The tree structure in the figure is an index tree. Node G represents the image block obtained by image segmentation, d represents the depth of the index tree, j represents the j -th node of the current layer, and n_d represents the total number of nodes in the current layer.

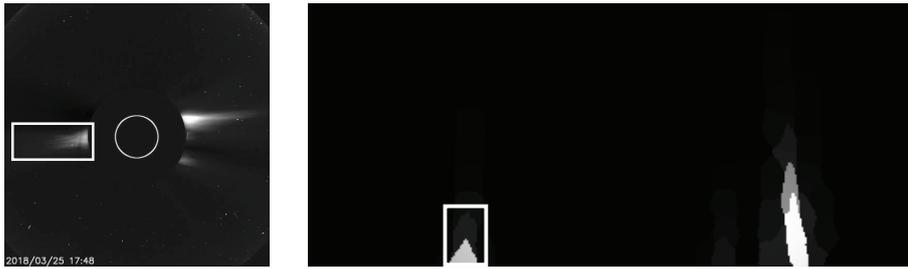


图4 含有冕流干扰情况示意图, 矩形框区域表示冕流。

Fig. 4 A schematic diagram of coronal streamers interference, and the area enclosed by a rectangular frame represents coronal streamers.

根据CME与冕流所呈现的运动属性的差异, 利用时间显著性可以排除冕流的干扰, 从而更为准确地检测出CME. 获取运动目标运动属性常用的方法有两帧差分法, 三帧差分法等. 三帧差分法具有易实现、对光线等场景变化不敏感, 适应性较好等优点, 适用于日冕图像. 本文采用Sengar等^[31]改进的三帧差分法来融合空时显著性, 充分利用日冕图像的前一帧与后一帧在时间维度所产生的信息差异, 能充分提取CME的时间显著性.

利用三帧差分融合CME空时显著性可表示为:

$$\begin{cases} D_t = |\text{Sal}_t - \text{Sal}_{t-1}|, \\ D_{t+1} = |\text{Sal}_t - \text{Sal}_{t+1}|, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Sal}_T = D_t \cap D_{t+1}, \quad (3)$$

其中, D_t 与 D_{t+1} 分别表示第 t 帧日冕图像显著图 Sal_t 和第 $t-1$ 帧显著图 Sal_{t-1} 的差分结果以及第 t 帧 Sal_t 和第 $t+1$ 帧 Sal_{t+1} 的差分结果. Sal_T 表示将两个差分图像进行交运算后得到的图像, 再将 Sal_T 经过阈值分割后得到空时显著图 $BSal_T$:

$$BSal_T = \begin{cases} 1, & \text{if } Sal_T > T, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad (4)$$

其中, T 表示分割阈值, 实验中取 $T = 0.7$. 由(4)式可知, 当 $BSal_T$ 的值为1时, 表示前景像素也即CME, 当 $BSal_T$ 的值为0时, 表示背景, 即无CME.

2.4 后处理

利用三帧差分法对日冕图像进行空时显著性融合后, 检测出来的CME目标可能存在部分“空洞”现象, 对检测出的CME区域进行形态学处理, 进一步优化检测结果.

将融合空时显著性的日冕图像检测出的CME区域 $BSal_T$ 进行形态学处理:

$$S_w = (BSal_T \bullet se) \circ se, \quad (5)$$

S_w 表示经过后处理后得到的完整的日冕图像区域, “ \bullet ”为闭合操作运算符号, “ \circ ”为开启操作运算符号, se 表示数学形态学操作掩膜. 当检测目标区域存在空洞时, 应用(5)式进行处理, 最终得到较为完整的CME区域.

3 实验结果与分析

本文的实验环境如下: CPU: Intel Xeon E3-1245 v5 3.5 GHz, RAM 32G, 操作系统为Windows 10 64位专业版, 编程运行环境为Matlab R2017a. 本文以两组不同时段产生的日冕图像序列作为实验数据, 以对应时间CDAW人工目录数据为基准, 与主流的自动检测方法CACTus、SEEDS等方法进行对比, 来验证本文方法的有效性.

3.1 CME的检测数量分析

CME的检测本质上属于一种分类任务, 为了更加全面地对比不同检测方法的优劣, 在这里给出适用于以人工目录CDAW为基准时CME检测任务中常用的参数以及评价指标. 主要有: 真阳性(True Positive, TP)也即CDAW检测到CME的同时也被对比方法检测到; 假阳性(False Positive, FP)也即CDAW未检测到CME的同时但对比方法却检测到了; 假阴性(False Negative, FN)也即CDAW检测到CME的同时但对比方法并未检测到; 真阴性(True Negative, TN)这里不适用, 已忽略.

通过上述参数可以计算出分类任务中常用的召回率(Recall)、精确率(Precision)、F1值(F1-score)等评价指标. 以人工方法CDAW为基准时, 召回率反映出相对基准方法的检测结果, 对比方法检出的CME所占比例, 即查全率; 精确率反映出对比方法所检出的CME中, 真实CME所占比例, 即查准率; F1值是对召回率与精确率的整体评价, 其大小介于0-1之间. CME检测评价指标如表1所示.

表2和表3展示了本文方法与人工方法CDAW及自动检测方法SEEDS、CACTus在两段日冕图像序列中所检测的CME个数以及相应的分类检测指标. 其中除表1中包

含的各项指标外, 检测总个数(Total number of detected)分别是不同方法在实验数据中对应时间段内所检测到CME个数.

表 1 CME检测方法性能评估指标

Table 1 Performance evaluation indexes of CME detection method

Assessment index	Formula
Recall	$TP/(TP + FN)$
Precision	$TP/(TP + FP)$
F1-score	$2 \times Precision \times Recall/(Precision + Recall)$

表 2 在时间段I中不同检测方法得到的结果对比(以CDAW为基准)

Table 2 Comparison of results obtained by different detection methods in time period I (based on CDAW)

Detecting algorithm	CDAW	SEEDS	CACTus	Ours
Total number of detected	44	118	34	50
TP	/	11	9	19
FP	/	107	25	31
FN	/	33	35	25
Precision	/	0.0932	0.2647	0.3800
Recall	/	0.2500	0.2045	0.4318
F1-score	/	0.1358	0.2307	0.4042

表 3 在时间段II中不同检测方法得到的结果对比(以CDAW为基准)

Table 3 Comparison of results obtained by different detection methods in time period II (based on CDAW)

Detecting algorithm	CDAW	SEEDS	CACTus	Ours
Total number of detected	25	33	11	35
TP	/	7	5	15
FP	/	26	6	20
FN	/	18	20	10
Precision	/	0.2121	0.4546	0.4286
Recall	/	0.2800	0.2000	0.6000
F1-score	/	0.2413	0.2777	0.5003

当以人工目录CDAW为基准参考目录时, 通过表2和表3的CME分类检测指标可以看出, 本文方法在两段时间内的CME检测准确率(也即召回率)均高于其他对比方法, 检测性能F1值也高于对比方法. 从检测CME数量上看, 相较于其他对比方法, 本文方法取得了较好的CME检测分类效果. 在表3可以看到, CACTus精确率虽然略高, 但

其检测准确率较低,反映出其漏检较多,而本文方法的召回率相对SEED和CACTus高出0.32和0.4,从整体评价指标F1值也可体现本文方法的优势.此外,从表2和表3还能看出本文方法在检测CME总个数方面要略多于人工目录CDAW,这可能由于人工记录CDAW目录数据时存在人为主观因素导致判断标准严苛造成漏检漏报等情况.从表2可以看到在时间段I期间发生的日冕图像序列中,SEEDS方法所检测到的CME个数最多,而CACTus所检测到的CME个数相对较少.

在同一个CME喷发过程中,CME随时间演变其形态发生变化.我们浏览了SEEDS目录日志电影,发现在对于同一个CME而言,当其后沿与前沿运动速度不一致时会发生形态、灰度上的差异,SEEDS会将有差异的后沿也检测成一个CME,从而导致误检,这也是SEEDS所检测到的CME个数多于CDAW和CACTus目录参考值的一个重要原因.

本文方法在时间段I中2014-01-19UT01:36时刻检测到一个中心角为 181° ,角宽度为 36° 的CME. SEEDS目录在该时刻附近检测有CME发生,但SEEDS将其误检为两个CME. SEEDS在2014-01-19UT01:36时刻检测出一个中心角为 171° ,角宽度为 6° 的CME,其持续时间至2014-01-19UT02:00,在2014-01-19UT01:48检测出一个中心角为 180° ,角宽度为 25° 的CME,其持续时间至2014-01-19UT02:36.通过观察分析可知,事实上SEEDS所检测到的两个CME为同一个CME,由于CME随时间演变,形态发生变化,因此造成了SEEDS误检.图5所示为SEEDS在时间段I中检测CME发生误检情况图像,该图由SEEDS官网提供,图中左上角为CME动态演化参数:差分时间(Time.Diff)、位置角(PAs)、高度(Height,其中Rs为与太阳半径的比值).图6为本文方法检测到该CME在直角坐标系下部分日冕图像序列的示意图,图中白色虚线扇形区域为CME.

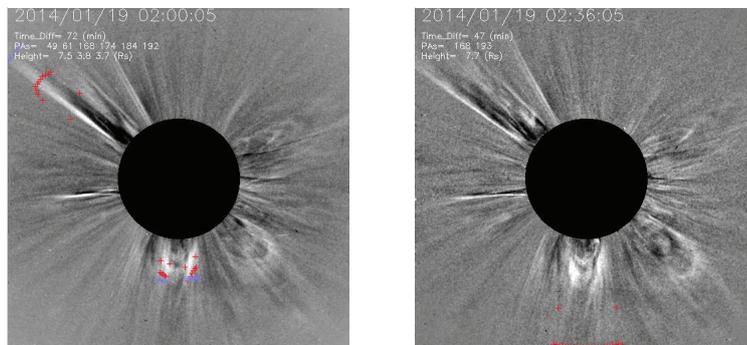


图5 SEEDS误检示例.左图为SEEDS在2014-01-19UT01:36检测的中心角度为 171° ,角宽度为 6° 的CME;右图为SEEDS在2014-01-19UT01:48检测的中心角度为 180° ,角宽度为 25° 的CME.图中,红色“+”表示SEEDS认为该区域为明显具有CME特征的区域,紫色“+”表示SEEDS认为该区域为可能是CME的区域.

Fig. 5 An example of SEEDS misdetection. Left: a CME with a center angle of 171° and an angular width of 6° detected by SEEDS at 2014-01-19UT01:36; right: a CME with a center angle of 180° and an angular width of 25° detected by SEEDS at 2014-01-19UT01:48. In the figure, red “+” indicates that SEEDS considers this area to be an area with obvious CME characteristics, and purple “+” indicates that SEEDS considers this area to be an area that may be CME.

通过表3可知,在时间段II中,CDAW目录检测到25个CME事件,本文方法检测到35个CME事件,本文方法检测出15个与CDAW目录特征一致的CME事件,以人工目录CDAW为基准时,本文方法的检测成功数多于SEEDS和CACTus.

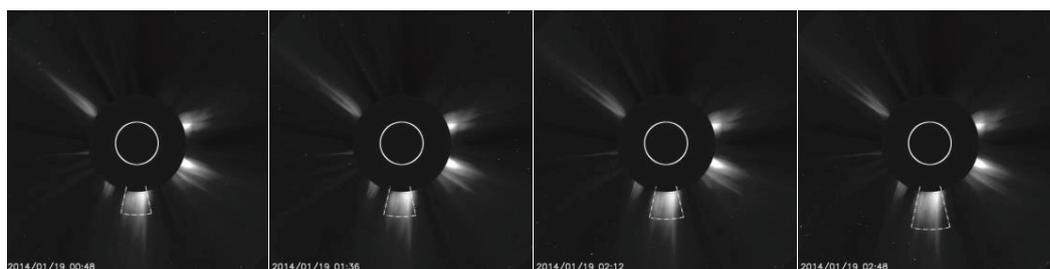


图 6 本文方法在2014-01-19UT01:36时刻附近检测的CME部分图像序列示意图, 图中白色扇形区域为本文方法检测的CME.

Fig. 6 A schematic diagram of the partial image sequence of the CME detected with our method near 2014-01-19UT01:36, where the white fan-shaped areas represent the CME.

此外, 从表3还能看出在CDAW目录中有10个CME事件未被本文方法检测到, 简记为情况1, 本文方法检测到的CME中有20个没有被CDAW目录检测到, 简记为情况2. 因此, 我们对这两种情况进行分析说明. 情况1如表4所示, 情况2如表5所示. 其中, “✓”表示检测方法检测到CME, “✗”表示检测方法未检测到CME.

表 4 情况1检测结果对比
Table 4 Comparison of test results in case 1

No.	Date and time	CDAW	SEEDS	CACTus	No.	Date and time	CDAW	SEEDS	CACTus
1	2018-05-19UT19:00	✓	✗	✓	6	2018-05-27UT01:25	✓	✗	✗
2	2018-05-21UT09:06	✓	✓	✓	7	2018-05-27UT06:12	✓	✗	✗
3	2018-05-23UT10:00	✓	✗	✗	8	2018-05-27UT22:00	✓	✗	✗
4	2018-05-25UT13:25	✓	✗	✗	9	2018-05-28UT11:24	✓	✗	✗
5	2018-05-26UT05:18	✓	✗	✗	10	2018-05-28UT12:48	✓	✗	✗

表 5 情况2检测结果对比
Table 5 Comparison of test results in case 2

No.	Date and time	Ours	SEEDS	CACTus	No.	Date and time	Ours	SEEDS	CACTus
1	2018-05-15UT02:36	✓	✗	✗	11	2018-05-20UT09:12	✓	✓	✓
2	2018-05-16UT01:13	✓	✗	✗	12	2018-05-20UT13:25	✓	✓	✓
3	2018-05-17UT01:36	✓	✗	✗	13	2018-05-20UT15:37	✓	✓	✓
4	2018-05-17UT21:12	✓	✗	✗	14	2018-05-21UT04:36	✓	✗	✗
5	2018-05-18UT07:12	✓	✓	✓	15	2018-05-21UT17:48	✓	✗	✗
6	2018-05-18UT13:36	✓	✗	✗	16	2018-05-22UT00:12	✓	✗	✗
7	2018-05-18UT23:48	✓	✗	✗	17	2018-05-23UT10:12	✓	✗	✗
8	2018-05-19UT10:48	✓	✓	✓	18	2018-05-27UT11:36	✓	✓	✗
9	2018-05-19UT17:36	✓	✗	✗	19	2018-05-29UT02:12	✓	✗	✗
10	2018-05-19UT21:24	✓	✗	✗	20	2018-05-31UT21:12	✓	✓	✓

在情况1中, 绝大多数事件为非常微弱的CME事件, 本文方法在情况1中存在漏检的情况, 如序号为2、5、7的CME事件. 通过浏览相应的目录日志电影, 我们发现CDAW的

检测结果也存在一些争议,如序号为3和8的CME事件发生状态不明显,无法完全判定为CME.此外,可能由于日冕仪成像设备原因,导致CDAW将日冕图像中突然出现的闪烁区域判定为CME,如序号为4和6,进而导致CDAW出现误检.

在情况2中,通过对比浏览CDAW、SEEDS、CACTus目录日志电影作为辅助分析,我们发现本文方法存在一些误检情况,如序号为9、10、14、15、16、19的CME事件,本文方法将这些非CME事件误检测为CME事件,这主要是对冕流的滤除效果不佳造成的.另外,由于检测到CME时的起始时间差异,存在本文方法检测到的多个CME对应CDAW中一个持续时间较长的CME的情况,如序号为11、12、13的CME事件,这3个事件对应CDAW目录中5月19日8时24分发生的一个CME事件.由于人工判断的主观原因,导致CDAW中存在漏检情况.在情况2中,存在两个CDAW漏检事件.第1个是表5中序号为18的CME事件,本文检测到这个CME中心角为 92° ,角宽度为 8° ,SEEDS在当日12时12分检测到中心角为 95° ,角宽度为 11° 的CME,通过浏览SEEDS目录日志电影,这的确是一个CME,但CDAW未检测到.第2个是序号为20的CME事件,本文检测到这个CME中心角为 74° ,角宽度为 21° ,SEEDS与CACTus在临近时刻均检测到这个CME,而CDAW未检测到,这说明本文方法能够检测到CDAW目录中遗漏的CME.图7为本文方法在2018-05-31UT21:12附近检测的一个CME演化的示意图.

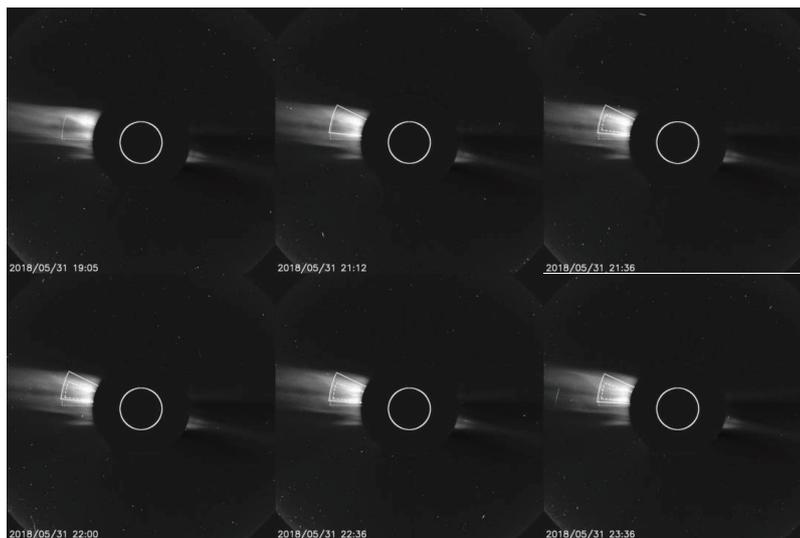


图7 本文方法在2018-05-31UT21:12检测到的CME演化情况,实线为本文检测结果,虚线为SEEDS目录检测结果,点线为CACTus检测结果.

Fig. 7 The CME evolution detected by the method in this paper at 2018-05-31UT21:12, solid line is the detection result of this paper, dashed line is the SEEDS catalog detection result, and dotted line is the CACTus detection result.

3.2 CME特征参数分析

通常,若给定CME的中心角度(位置角)、角宽度等物理位置参数,就能在日冕图像中确定一个CME的发生位置和形态^[7, 32].因此,本文还从中心角、角宽度等物理参数方面出发来验证本文方法的有效性.

3.2.1 CME的中心角度

中心角度是区分不同CME的核心特征物理参数, 本文从两组不同时间段的日冕图像中检测CME中心角度, 图8所示为在两段时间内本文方法与人工参考目录CDAW共同检测到的CME中心角度误差统计图, 图中横轴为中心角度之差的绝对值, 纵轴为单个事件数占所检测事件总数的比例。

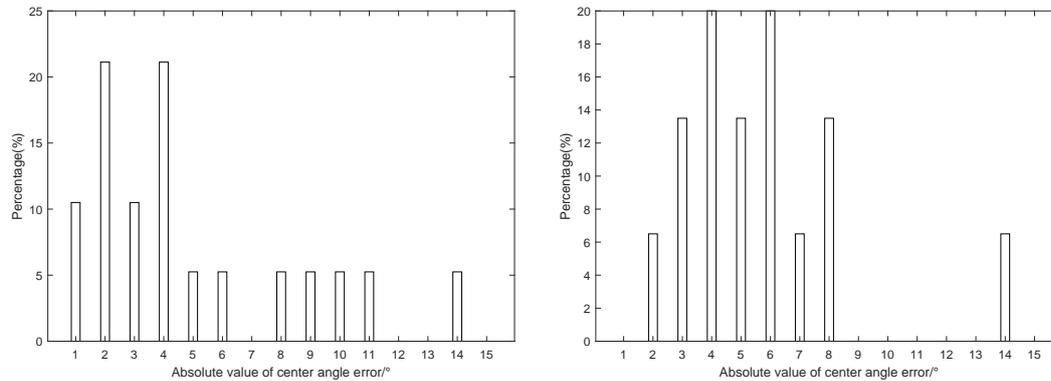


图8 左图为时间段I中本文方法与CDAW目录共同检测的CME中心角度统计误差图; 右图为时间段II中本文方法与CDAW目录共同检测的CME中心角度统计误差图。

Fig. 8 Left panel shows the statistical error of the CME center angle detected by this method and the CDAW catalog in time period I; right panel shows the statistical error of the CME center angle detected by this method and the CDAW catalog in time period II.

结合图8可以看出, 当以人工目录CDAW为基准参考时, 本文方法检测的CME中心角度与人工目录CDAW的数值总体上误差较小, 精度较高。

本文方法与人工方法CDAW和自动方法SEEDS、CACTus在两个时间段内共同检测到的CME中心角度分布情况, 如图9所示, 图中横坐标表示4种方法共同检测到的CME个数的序号, 纵坐标表示中心角度数值, 单位是度($^{\circ}$)。图9 (左)为4种方法在时间段I中共同检测到的5个CME的中心角度分布折线图, 图9 (右)为4种方法在时间段II中共同检测到的5个CME的中心角度分布折线图。从图9可以看出, 当以人工检测方法CDAW为基准时, 本文方法在两个时间段内所检测的CME中心角度与SEEDS、CACTus方法相比更靠近人工CDAW, 具有一定的可靠性。

为进一步分析说明, 当以人工目录CDAW为基准参考时, 本文方法在检测CME中心角度上的优势, 表6中给出了本文方法与人工方法CDAW和自动方法SEEDS、CACTus在两段时间内共同检测到的10个CME中心角度的平均误差以及误差的标准差。

从表6可以看出, 以人工目录CDAW数据为基准时, 本文方法的中心角度平均误差最小。此外, 中心角度误差的标准差也反映出本文方法所检测的CME中心角度与SEEDS、CACTus等方法相比更接近人工方法CDAW检测的参考值。

通过上述分析, 结合CME中心角度的平均误差和标准差分布情况, 当以人工目录CDAW为基准参考时, 本文方法在共同检测到CME的中心角度方面比SEEDS、CACTus具有更好的稳定性。尤其是与SEEDS相比时, 所检测到CME中心角度数值误差起伏较小。

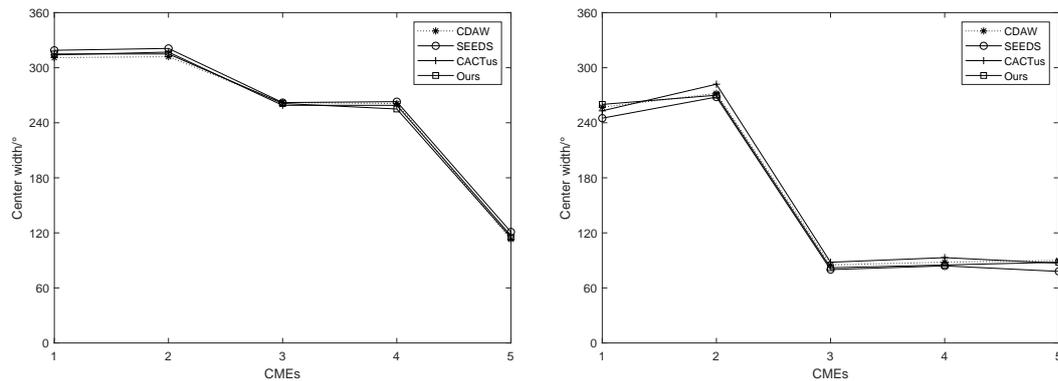


图 9 左图为在时间段I中本文方法与其他方法共同检测的5个CME的中心角度对比; 右图为在时间段II中本文方法与其他方法共同检测的5个CME的中心角度对比。

Fig. 9 Left panel is a comparison of the center angles of 5 CMEs detected by this method and other methods in time period I; right panel is a comparison of the center angles of 5 CMEs detected by this method and other methods in time period II.

表 6 本文方法与SEEDS、CACTus在两段时间内共同检测到CME中心角度平均误差及误差标准差(以CDAW目录为基准)

Table 6 The average error and standard deviation of the center angles of the CMEs detected by the method in this paper, SEEDS and CACTus in two periods of time (based on the CDAW catalog)

Detecting algorithm	The average error/ $^{\circ}$	The error of standard deviation/ $^{\circ}$
SEEDS	6.4	4.1
CACTus	4.2	2.3
Ours	4.1	2.1

3.2.2 CME的角宽度

角宽度也是CME核心特征物理参数之一, 常用来描述CME爆发时的形态特征. 为进一步分析说明本文方法在检测CME角宽度上的优势, 以人工目录CDAW为基准参考, 本文与CDAW、SEEDS、CACTus等方法在两组时间段内共同检测到的CME个数均为5, 其角宽度分布折线图如图10所示. 图中横坐标表示4种方法共同检测到的CME个数的序号, 纵坐标表示角宽度数值. 图10 (左)为4种方法在时间段I中共同检测到的5个CME的角宽度分布折线图, 图10 (右)为4种方法在时间段II中共同检测到的5个CME的角宽度分布折线图.

通过图10可以看出, 当以人工方法CDAW检测结果为基准时, 本文方法所检测到的CME角宽度比SEEDS、CACTus等方法更靠近人工方法CDAW检测参考值.

为进一步比较说明本文方法在检测CME角宽度时的优势, 此处还给出了以人工目录CDAW为基准参考时, 本文方法与自动方法SEEDS、CACTus在两组时间段内共同检测到的10个CME的角宽度平均误差与误差的标准差, 如表7所示.

从表7可以看出, 当以人工目录CDAW为基准参考时, 一方面, 本文方法的角宽度误差最小, 这说明本文方法在检测CME角宽度方面总体数值与人工目录CDAW参考值

比较靠近. 另一方面, 角宽度误差的标准差也反映出本文方法比SEEDS、CACTus更接近CDAW目录数值的同时误差波动起伏较小, 具有一定的可靠性.

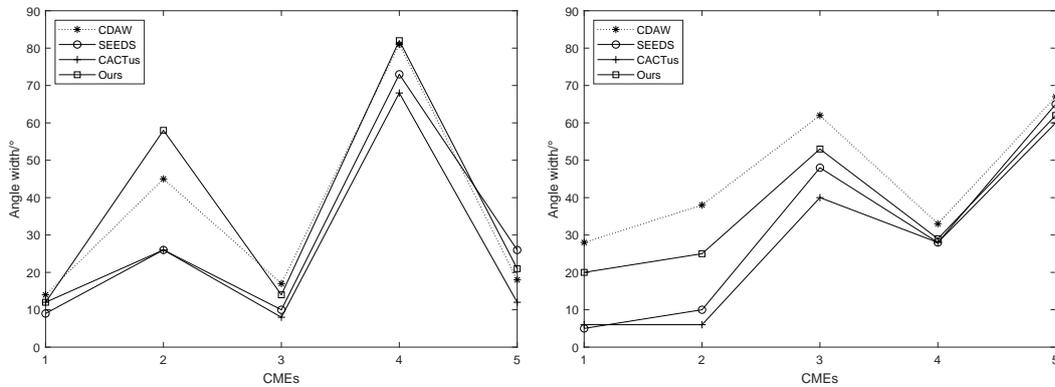


图 10 左图为在时间段I中本文方法与其他方法共同检测的5个CME角宽度对比; 右图为在时间段II中本文方法与其他方法共同检测的5个CME角宽度对比.

Fig. 10 Left panel is a comparison of 5 CMEs angular widths detected by this method and other methods in time period I; Right panel is a comparison of 5 CMEs angular widths detected by this method and other methods in time period II.

表 7 本文方法与SEEDS、CACTus在两段时间内共同检测到的CME的角宽度平均误差及误差标准差(以CDAW目录为基准)

Table 7 The average error and standard deviation of the angular widths of the CMEs detected by the method in this paper, SEEDS and CACTus in two periods of time (based on the CDAW catalog)

Detecting algorithm	The average error/°	The error of standard deviation/°
SEEDS	11.7	8.6
CACTus	13.7	9.7
Ours	5.9	4.1

4 总结与展望

本文选取部分SOHO LASCO C2日冕图像并进行处理, 以人工目录CDAW数据为基准, 进行CME检测. 针对现有检测方法因忽略CME的时间运动信息, 导致检测结果存在一定偏差, 且易将冕流等非CME结构认为是CME等问题, 本文使用基于结构化矩阵分解的空间显著性检测方法初步得到日冕图像的显著前景, 使用三帧差分法将CME的时间显著性与空间显著图融合, 滤除部分冕流的干扰. 实验结果表明, 与以往的检测方法相比, 当以人工目录CDAW为参考时, 本文方法不仅在检测数量上具有一定的可靠性, 而且在检测CME特征物理参数上具有一定的优势. 此外, 本文方法采用无监督学习的方式, 在一定程度上避免有监督方式带来的人工主观误差, 使得检测结果更加客观.

本文工作具有以下创新意义: 一是将显著性检测方法引入CME检测, 无监督方式无需人工制作大量标签图像. 二是将CME的运动时间信息加以利用, 取得较好的检测效果.

同时, 本文工作可为我国ASO-S^[4-5]相关研究工作提供一定的参考. CME的检测仅是探究CME爆发现象的起点, 在未来, 我们将致力于研究CME向行星际空间运动继而形成行星际日冕物质抛射(Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME)及其传播机制、到达地球的时间等^[33], 这些都将是后续研究的重点, 对预测空间天气防灾减灾有着重要意义.

参 考 文 献

- [1] 姚海, 尹建芹, 林佳本, 等. 科学通报, 2017, 62: 2680
- [2] Domingo V, Fleck B, Poland A I. SoPh, 1995, 162: 1
- [3] Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, et al. SSRv, 2008, 136: 67
- [4] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
- [5] 黄宇, 陈鹏飞, 甘为群. 天文学报, 2020, 61: 1
- [6] Yashiro S, Gopalswamy N, Michalek G, et al. JGR, 2004, 109: A07105
- [7] 郭敏, 尚振宏, 强振平, 等. 天文研究与技术, 2020, 17: 39
- [8] Robbrecht E, Berghmans D. A&A, 2004, 425: 1097
- [9] Qu M, Shih F Y, Jing J, et al. SoPh, 2006, 237: 419
- [10] Colaninno R C, Vourlidas A. ApJ, 2006, 652: 1747
- [11] Olmedo O, Zhang J, Wechsler H, et al. SoPh, 2008, 248: 485
- [12] Boursier Y, Lamy P, Llebaria A, et al. SoPh, 2009, 257: 125
- [13] Goussies N, Stenborg G, Vourlidas A, et al. SoPh, 2010, 262: 481
- [14] Goussies N A, Mejail M E, Jacobo J, et al. PaReL, 2010, 31: 496
- [15] 曾昭宪, 刘毅, 魏雅利. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40: 379
- [16] 曾丹丹, 白先勇, 强振平, 等. 科学通报, 2016, 61: 1255
- [17] Yin J Q, Yao H, Lin J B, et al. Neurocomputing, 2017, 244: 123
- [18] Zhang L, Yin J Q, Lin J B, et al. NewA, 2016, 48: 49
- [19] Zhang L, Yin J Q, Lin J B, et al. SoPh, 2017, 292: 91
- [20] Wang P Y, Zhang Y, Feng L, et al. ApJS, 2019, 244: 9
- [21] 单家辉, 封莉, 袁汉青, 等. 天文学报, 2020, 61: 45
- [22] Shan J H, Feng L, Yuan H Q, et al. ChA&A, 2020, 44: 507
- [23] Qiang Z P, Bai X Y, Zhang Q H, et al. AdAst, 2019, 2019: 6582104
- [24] Hundhausen A J. JGRA, 1993, 98: 13177
- [25] Liu L, Gao B, Wu S C, et al. InPhT, 2020, 107: 103288
- [26] Peng H W, Li B, Ling H B, et al. ITPAM, 2017, 39: 818
- [27] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. ITPAM, 2012, 34: 2274
- [28] Chen J Z, Chen J, Ling H F, et al. JVCIR, 2018, 50: 270
- [29] Lin Z C, Liu R S, Su Z X. arXiv: 1109.0367, 2018
- [30] Miao Y, Liu Y, Li H B, et al. ApJ, 2018, 869: 39
- [31] Sengar S S, Mukhopadhyay S. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42: 3621
- [32] 高朋鑫, 李可军. 天文学进展, 2008, 26: 115
- [33] Wang Y M, Liu J J, Jiang Y, et al. ApJ, 2019, 881: 15

Detection of Coronal Mass Ejection Based on Spatial-temporal Saliency

YANG Zhi-peng¹ SHANG Zhen-hong¹ QIANG Zhen-ping² XIN Ze-huan¹
XIAN Xiang-gui¹ XIA Guo-qiang¹

(1 Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

(2 College of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

ABSTRACT Coronal Mass Ejections (CMEs) are one of the most severe solar eruptive phenomena, which could introduce significant disturbances to the interplanetary space and further affect human production and life. Here in this paper, we introduce the saliency detection method into the CME detection based on their spatial-temporal saliency, which uses a structured matrix to decompose the feature matrix corresponding to SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment) C2 corona images and restores the sparse part to obtain a salient foreground. We then consider the temporal saliency generated by the motion of CMEs to remove non-CME structures such as coronal streamers, and finally give the detection results. Experiments further show that, based on detection results from the Coordinated Data Analysis Workshop (CDAW), the proposed method is not only superior to the Computer Aided Tracking CME Software package (CACTus) and the Solar Eruptive Event Detection System (SEEDS) in the number of CMEs successfully detected, but also closer to the CDAW catalog reference values than CACTus and SEEDS in measuring the characteristic physical parameters of CMEs including their center angles and angular widths.

Key words Sun: coronal mass ejections (CMEs), techniques: image processing, methods: spatial-temporal saliency fusion