基于 NVST 观测的米粒识别和形态特征分析

韩翠翠, 蒋霞, 杨云飞, 邓辉, 王锋, 冯松*

昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南省计算机技术应用重点实验室, 昆明 650500

* 联系人, E-mail: ynkms@escience.cn

2015-05-27 收稿, 2015-06-29 修回, 2015-07-13 接受, 2016-01-04 网络版发表

国家自然科学基金(U1231205, U1531132, 11463003, 11573012, 11303011)资助

摘要 米粒组织是太阳表层对流运动所产生的一种形态特征. 由于米粒强度分布不均匀以及边缘比较模糊, 使得采用传统的基于强度和梯度阈值的方法来准确地识别它们变得困难. 因此, 本文提出了一个基于相位一致性的米粒识别算法. 选用中国科学院云南天文台抚仙湖的新一代太阳真空望远镜 (New Vacuum Solar Telescope, 简称 NVST) 的高分辨活动区观测资料来展示算法的识别过程, 并根据识别结果分析了米粒的形态特征. 选取了2个目前已存在的米粒识别算法来验证所提算法的准确性和有效性, 实验结果表明所提算法能够有效地提取那些低对比度的米粒特征. 同时为了检验算法对阈值的响应程度, 分别选取了3组阈值来检验不同阈值情况下的差异性. 结果证明所提算法对阈值响应不敏感. 为了进一步检验所提算法获取统计结果的准确性, 对米粒的直径、强度、形状以及分形维数进行统计. 统计结果很好地符合了已有文献的结论, 这也进一步验证所提算法的准确性和健壮性, 能够用于进一步的科学研究.

关键词 NVST, 米粒, 相位一致性技术

米粒组织是太阳从对流层到光球层的等离子体对流运动所产生的现象. 在太阳光球层上它们是呈现为粒状物, 形似蜂窝状, 周围被暗径包围. 研究米粒的形态特征和演化过程能帮助我们更好地了解太阳表层对流运动的产生机制以及这种机制和太阳磁场活动之间的关系. 研究结果表明在太阳表层存在两类尺度的米粒对流运动, 这两类尺度的米粒组织代表着不同的运动特征和物理机制^[1-7]. 通常, 分类主要是基于强度分布^[1-3]、直径阈值^[1,4]等方法. 例如, Hirzberger等人^[1]根据强度随面积的变化曲线来确定米粒分类标准. Berrilli等人^[2]和Steffen等人^[3]发现米粒平均对比度随面积的增加而发生变化的地方大约是1000 km. Roudier和Muller^[4]根据米粒直径分布特征将990 km作为米粒的分类阈值. Abramenko等人^[5]也是根据直径的直方图来决定米粒的分类判据, 但

这个判据则是采用幂函数的形式来得到的, 他们把米粒分为大于600 km的大米粒和小于600 km的小米粒. 除此, 其他的一些分类方法也被用于米粒的分类, 如Yu等人^[6,7]则根据多普勒速度方向或X-mean聚类算法确定米粒直径的分类阈值. 上述这些文献根据分类结果来研究不同尺度下的米粒形态特征以及演化过程. 因此, 米粒结构的准确提取对于研究这种对流运动是至关重要的.

为了研究米粒结构, 一些识别和提取算法已经被提出. 文献[1,4,5,8,9]分别利用图像的强度和梯度阈值来识别和提取米粒形状和定义米粒元胞结构. Berrilli等人^[10]应用多尺度高斯拉普拉斯算子来识别米粒的结构. Bovelet和Wiehr^[11]利用多级强度阈值来提取米粒, 这个方法类似于图像处理中的分水岭算法. Yu等人^[7]应用标记分水岭技术识别宁静区米粒.

引用格式: 韩翠翠, 蒋霞, 杨云飞, 等. 基于 NVST 观测的米粒识别和形态特征分析. 科学通报, 2016, 61: 881-890

Han C C, Jiang X, Yang Y F, et al. Identification and morphology analysis of granules using the New Vacuum Solar Telescope Observations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 881-890, doi: 10.1360/N972015-00591

上述的这些方法主要是基于强度和梯度阈值来识别米粒结构. 由于米粒在快速演化过程中, 米粒的强度分布不均匀, 且存在边缘模糊, 使得传统的基于强度和梯度阈值的方法在识别时往往存在很大的局限性, 如过分割或者误分割, 以及准确性差等问题.

为了提高米粒识别的准确性, 本文提出一种基于相位一致性的米粒识别算法, 然后运用识别结果来寻找米粒的分类准则, 并依据分类标准来分析米粒的强度以及形态特征等, 用已有统计结果作对比来检验所提算法的准确. 同时, 与其他识别算法的比较也将在本文中展示. 为此, 本文选用中国科学院云南天文台抚仙湖观测基地的一米红外太阳塔望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)^[12-14]的高分辨率活动区观测资料来展示所提算法的识别过程, 进而去分析米粒的形态特征.

1 观测数据

NVST位于中国科学院云南天文台抚仙湖观测基地. 它的有效口径为985 mm, 有效视场大于3角分. 其主要仪器包括: 多通道高分辨率成像系统(multi-channel high resolution imaging system)、多波段光谱仪、大色散光谱仪、偏振分析器及自适应光学系统. 目前有3个通道, 分别是氧化钛(TiO)、G和H α 波段. 其中, TiO波段的中心波长为705.8 nm, 透过带宽1.0 nm.

为了检验所提算法的准确性和鲁棒性, 同时也是为了检验统计结果的普适性, 分别选取了2组高分辨TiO图像序列. 数据A是在2012年10月29日05时59分05秒~2012年10月29日06时31分16秒(UT)获得的高分辨TiO序列图像, 观测对象为活动区 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 11598, 日面坐标位置是S11°W27°. 数据B是在2013年08月01日03时38分15秒~2013年08月01日03时54分47秒(UT)获得的高分辨TiO图像, 活动区为NOAA 11801, 其日面坐标为W31°N24°. 这2组图像各包含50幅图像, 图像的像素分辨率均为0.041角秒. 这2组图像的视场分别为2280像素 $\times$ 1880像素和1800像素 $\times$ 1500像素. 图1展示了来自于这2个序列中的一个样本.

2 米粒识别

Morrone等人^[15]发现除了强度和梯度以外相位一致性特征也是一个描述图像特征的最基本量.

图1 NVST的TiO高分辨观测数据. (a) 数据A的一个样本, 观测时间是2012年10月29日05时59分05秒(UT). 图中左上角的白色矩形框标记的区域是图2用于展示识别过程和结果的区域; (b) 数据B的一个样本, 观测时间是2013年08月01日03时38分15秒(UT). 图中的白色矩形区域为图8中对比试验所选择的区域

Figure 1 Two samples obtained from the NVST. (a) A sample from data set A, which was obtained on 2012 October 29 at 05:59:05 UT. The white rectangular box located at the top left hand corner is used to illustrate the identification processing mentioned in Section 2; (b) a sample from data set B. It was obtained on 2013 August 01 at 03:38:15 UT, where the white rectangular box is used in Figure 8 to illustrate the comparison test of the other identified method

Kovesi^[16,17]对这一理论进行了发展, 他不但证明了相位一致性在表征特征结构时对强度、对比度、照度具有不变性, 而且通过计算图像的局部能量实现了对相位一致性特征的稳定提取. 目前, 相位一致性技术已经被用于识别和提取低对比度太阳图像特征, 如本影点、本影闪耀, 以及冕环^[18,19]. 本文利用相位一致性来识别米粒的特征结构. 下面首先简要地介绍相位一致性技术, 然后详尽地介绍所提算法的识别过程.

2.1 相位一致性技术

Morrone等人^[15]发现人类视觉感知的图像特征出现在图像Fourier域中各谐波分量相位一致处, 从

而提出图像特征相位一致性的计算方法:

$$PC(x) = \max_{\bar{\phi}(x) \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(\phi(x) - \bar{\phi}(x))}{\sum_n A_n(x)}, \quad (1)$$

其中, $\sum_n A_n \cos(\phi(x) - \bar{\phi}(x))$ 被定义为局部能量 $E(x)$, $\phi(x)$ 为 x 点位置 Fourier 谐波分量的局部相位. A_n 为 n 次谐波分量的幅度.

随后, Kovesi^[16,17] 对这一理论进行了发展, 不但证明了相位一致性在表征特征结构时对强度、对比度、光照度具有不变性, 而且通过计算图像的局部能量实现了对相位一致性特征的稳定提取. 并利用 Log-Gabor 小波对相位一致性的计算方法做出了一个新的定义:

$$PC^{2D}(x) = \frac{\sum_o \sum_s W_o(x) [A_{so}(x) \Delta \Phi_{so}(x) - T_o]}{\sum_o \sum_s A_{so}(x) + \varepsilon}, \quad (2)$$

其中,

$$\Delta \Phi_{so}(x) = \cos(\phi_{so}(x) - \bar{\phi}(x)) - \left| \sin(\phi_{so}(x) - \bar{\phi}(x)) \right|,$$

o 和 s 分别为滤波器的方向和尺度. $\bar{\phi}(x)$ 为点 x 处的加权平均相位角 (local weighted mean phase angle, LWMPA).

Kovesi 的研究表明 LWMPA 是相位一致性的一种表征方式. 它以谐波分量的振幅作为权重来计算空间坐标位置上各个谐波分量的平均相位角, 把振幅和相位结合起来, 从而反映图像的局部空间特征结构变化. LWMPA 的取值范围是 $[-\pi/2, \pi/2]$, 其中 $-\pi/2$ 和 $\pi/2$ 则分别表示图像的一个局部区域内明暗特征极值位置, 而 0 则表示特征由明转暗 (或由暗到明) 的分界, 表示图像底层特征的边缘. 通常可以用大于或等于 0 作为提取局部特征的阈值^[18,19].

2.2 米粒识别过程

基于相位一致性的米粒识别过程展示在图 2 中. 图 2(a) 是图 1 左上角白色方框所标记的区域. 在图中有 3 个箭头所指示的区域, 其上米粒的强度分布明显不同, 这些区域的强度明显低于其上米粒结构的其他部分, 下面将具体介绍米粒的识别过程:

(i) 提取图像的相位一致性特征. 此步骤是运用公式 (2) $\bar{\phi}(x)$ (即加权平均相位角) 来获取图像的相位一致性特征. 结果如图 2(b) 所示. 这个图的取值范围是在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 之间. 图中的明暗表示相位一致性的特征, 越亮则表示此处亮的结构特征越显著

图 2 (网络版彩色) 米粒识别的主要过程. (a) 在图 1(a) 中用白色矩形框标记的区域, 尺度是 400×400 pixels; (b) 加权平均相位角图像; (c) 使用 0.05 阈值所获得的米粒区域的二值化图像; (d) 用形态学填充算子所获取的最终米粒的二值图像; (e) 将识别的米粒边界标记到原图上

Figure 2 (Color online) Procedure of granule recognition algorithm. (a) An image with 400×400 pixels marked in Figure 1 with a white rectangular box; (b) LWMPA image; (c) binary image obtained by the threshold 0.05, in which some holes can be found on some bright patches; (d) the result of granules identification. Here, the morphological hole fill operator is used to fill these holes; (e) an image marked by the identified granular boundaries

(如米粒结构), 越暗则表示暗的结构显著 (如米粒暗径). 从这张图可以看出, 在图 2(a) 中的明暗特征被这个加权平均相位角图很好地刻画出来. 但正如箭头所指示的, 这些区域的加权平均相位角为负值.

(ii) 二值化. 为了从图 2(b) 中提取米粒结构, 对图 2(b) 进行二值化处理. 其处理结果如图 2(c) 所示, 在这里选取二值化阈值为 0.05 (关于选择不同阈值对于识别和统计结果的影响将在第 4 节展开讨论). 从图 2(c) 中能发现在米粒上存在一些小的空洞, 如在图 2(c) 中箭头所示. 其原因是此处的平均加权相位角值小于阈值 0.05, 从而在二值化时产生空洞. 但这些区域也属于米粒结构的一部分, 必须对这些空洞进行处理.

(iii) 形态学滤波. 为了填充在米粒结构上存在的空洞, 使用形态学滤波中的空洞填充操作来对其进行填充, 结果如图2(d)所示. 在图2(c)中所标记的空洞已经被填充, 使之形成一个完整的米粒结构. 在图2(d)中所标记的白色区域即为算法所识别的米粒结构. 为了显示所识别的区域, 这些米粒的边界使用曲线标记在原图上, 结果在图2(e)中. 从图中可以看到, 米粒结构被很准确地标记出来, 证明所提出的识别算法是有效的.

图3展示了图1的识别结果. 在图3中, 黑子以及pore的边缘用了曲线来标记, 黑子识别算法是采用文献[20]所提出的黑子识别算法. 此黑子识别算法主要是采用图像处理技术中的形态学重构和区域增长技术来识别高分辨观测图像中黑子结构. 从图3的结果来看, 米粒和黑子以及小pore被准确地识别出来, 为下一步更准确地分析米粒特征打下了基础.

3 结果与分析

3.1 米粒分类

应用上述算法对数据A和B中图像进行了米粒的识别, 数据A识别出165694个, 数据B识别出108279个. 根据公式(3)计算了每个米粒的等效直径. 由于这2组数据都偏离了日面中心的位置, 为此采用投影校正系数分别对所获得的米粒的直径进行了校正. 对数据A的校正系数是1.17, 数据B的校正系数是1.29. 即获得的直径分别乘以对应的系数来消除投影效应的影响. 在这里为了统计特征分析的准确性, 剔除了直径小于350 km和大于3000 km的特征结构, 最后, 数据A和B各自剩余79853个和70776个米粒特征结构被提取出来用于后续的米粒形态特征分析. 在这里, 米粒的等效直径和面积之间的关系定义为

$$D_g = \sqrt{4A/\pi}, \quad (3)$$

其中, D_g 是单个米粒的等效直径, A 是单个米粒的面积.

米粒的等效直径的统计直方图如图4所示. 图4(a)展示的是来自数据A的米粒直径分布图, 图4(b)是来自于数据B的直径分布图. 在这里按照Abramenko等人^[5]所提出的用幂函数和高斯函数拟合等效直径的方法分别对数据A和B的等效直径的分布进行了拟合. 拟合结果如虚线曲线所示. 在图4(a)中, 点虚线指出在780 km的位置存在一个谷值, 点线虚线指出高斯分布的峰值位置在1164 km处. 在图4(b)中的谷

图3 (网络版彩色)图1的识别结果. 图中曲线标明黑子以及pore的边界, 白色的曲线是标记识别出的米粒的边界

Figure 3 (Color online) The identified result for Figures 1, in which curves indicate the boundaries of the sunspot and the pores, and the white curves are the boundaries of the identified granules

值也是在780 km处, 而高斯的峰值是在1311 km. 尽管运用所提算法获得的米粒分类标准与文献[1~7]所给出分类依据不同, 但我们的分类结果同Abramenko等人^[5]的分类标准相一致. Abramenko等人^[5]是使用美国大熊湖天文台新太阳望远镜(New Solar Telescope)的观测数据发现, 在太阳宁静区存在一种小于600 km的小尺度米粒结构特征. 本文分类结果很好地支持了上述结论. 依据Abramenko等人^[5]对米粒的命名方法, 将这2类尺度的米粒命名为 mini米粒(直径小于约780 km)和regular(直径大于780 km)米粒. 在数据A中, 提取到的regular米粒的个数占提取到的米粒总数的66%, 面积则占总米粒面积的93%; 提取到的mini米粒个数占了34%, 面积仅占了7%. 而在数据B中, 提取到的regular米粒个数占提取到的米粒总数的72%, 面积则占总米粒面积的95%; 提取到的mini米粒占了28%, 面积仅占5%. 从统计结果来看, 数据A和B在分类、个数和面积方面得到的结果基本相同. 运用所提算法到不同时间段的观测资料上得

图 4 (网络版彩色)米粒的等效直径的统计直方图。(a) 数据A的米粒等效直径分布直方图以及它的拟合曲线;(b) 数据B的米粒等效直径分布直方图以及它的拟合曲线图

Figure 4 (Color online) The histogram of the equivalent diameter. (a) The histogram of data set A granules and their fit function of the equivalent diameter; (b) the histogram of data set B granules and their fit function of the equivalent diameter. The dotted line is the position of the valley at 780 km

到相同的结论,证明了所提算法的准确性和健壮性。

3.2 米粒平均强度

根据数据A和B米粒的分类标准,分别对数据A和B米粒的平均强度和平均光球强度比进行了研究。其中平均光球强度 I_0 是整个视场中剔除了黑子之后的平均强度。这个比值的统计结果如图5所示,其中虚折线表示regular米粒的强度分布,而实折线表示mini米粒分布。从统计直方图可以发现2组数据的米粒的平均强度基本符合高斯分布,数据A中regular和mini米粒平均强度分别是 $(1.047 \pm 0.024)I_0$ 和 $(1.024 \pm 0.033)I_0$ 。数据B中2类米粒平均强度分别为 $(1.044 \pm$

$0.025)I_0$ 和 $(1.012 \pm 0.030)I_0$ 。从统计结果可发现这2组数据米粒平均强度的结果基本一样,并且都与文献[7,21]得到的强度范围和峰值一致。

3.3 米粒长轴/短轴的统计

从识别结果可以发现米粒的形态呈现不规则的椭圆,采用Feng等人^[22]的定义方法来获取米粒结构的长短轴。这个长短轴可由协方差矩阵来获得,其定义如下:

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

图 5 (网络版彩色)数据A(a)和B(b)的米粒平均强度直方图。实线表示mini米粒的强度分布,而虚线则表示regular米粒的分布

Figure 5 (Color online) Histograms of granule intensity from data sets A (a) and B (b). The solid and dotted curves show the distribution of mini and regular granules, respectively

图6 (网络版彩色)数据A(a)和B(b)中米粒长轴/短轴的直方图. 实线代表mini米粒的分布, 虚线代表regular米粒的分布

Figure 6 (Color online) Histograms of the ratio of granule long axis and short one from data sets A (a) and B (b). The solid curve shows the distribution of the mini granules, and the dotted one indicates that of the regular granules

长短轴是这个矩阵的特征值, 其定义如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 2\sqrt{2\left[J_{xx} + J_{yy} + \sqrt{(J_{xx} + J_{yyy})^2 - 4(J_{xx}J_{yy} - J_{xy}^2)}\right]} \\ \lambda_2 = 2\sqrt{2\left[J_{xx} + J_{yy} - \sqrt{(J_{xx} + J_{yyy})^2 - 4(J_{xx}J_{yy} - J_{xy}^2)}\right]} \end{cases} \quad (5)$$

这个比值即为特征值比, $E = \lambda_1/\lambda_2$.

数据A和B中米粒长短轴比值的统计结果, 如图6所示, 数据A中regular米粒和mini米粒的峰值均出现在1.6~1.8附近, 数据B中regular米粒和mini米粒的峰值均出现在1.3~1.7附近. 说明regular米粒和mini米粒的形状都呈现扁长的形态.

3.4 米粒分形维数的分析

分形维数是刻画米粒不规则化形态的一个重要参数, 它的计算方法如下:

$$P \sim A^{D/2} \rightarrow \log P = \frac{D}{2} \log A + b, \quad (6)$$

A为每个米粒面积即每个米粒所包含的像素数, P为每个米粒的周长即每个米粒轮廓边界所包含的像素数, D为分形维数, 其值是周长和面积的对数比的2倍. 通常认为湍流具有分形性质, 湍流的形成与流体雷诺数有关. 在雷诺数相当大和各项同性的三维湍流中, 能量散逸区域为分形结构.

根据公式(6)分别计算了数据A和B各自的regular米粒和mini米粒的分形维数. 图7(a)和(b)分别展示数据A的regular米粒和mini米粒的分形维数. 图7(c)和(d)分别展示数据B的regular米粒和mini米粒的分形维数. X轴是面积的对数, Y轴则是周长的对数. 我们采

用的方法是首先对X轴进行分块, 根据面积分了40个区域的数据, 然后针对每一分块中数据再做高斯拟合来获取均值和方差. 这样做的目的是获取每一块的均值. 然后利用线性函数来拟合米粒周长和面积取对数后的关系. 其斜率的2倍即为分形维数. 数据A中regular米粒周长和面积线性关系的斜率为0.75, 即regular米粒的分形维数为1.50. mini米粒的斜率为0.65, 即mini米粒的分形维数为1.30. 我们还可知数据B中regular米粒周长和面积取对数后的线性关系的斜率为0.66, 即regular米粒的分形维数为1.32. mini米粒的斜率为0.62, 即mini米粒的分形维数为1.24.

表1列出了已有文献[23~25]对于米粒分形维数研究的结果. 同时从数据A和B得到的结果也被列于表中. 从表1中对比可以发现, 数据A和B中的mini米粒的分形维数与前人从宁静区所得到小于1000 km尺度的米粒结果相当, 这个结果接近Kolmogorov理论^[26]中描述湍流运动的预测值(即为4/3). 但是regular米粒的分形维数却分别是1.50和1.32, 这个结果显然不同于宁静区的large米粒的分形维数.

4 讨论

4.1 对比试验

为了验证所提出米粒识别算法准确性, 选取已有识别方法(阈值技术方法^[4]和标记分水岭方法^[6,7])来对图1(b)所标记的白色区域进行米粒识别, 并和所提算法做对比, 来检验所提算法的准确性. 对比结果如图8所示. 图8(a)中即为图1(b)中用白色方框标记的区域, 为了更清晰地对比识别结果, 随机选取了3个

图 7 (网络版彩色)米粒周长和面积的对数关系. (a)和(b)分别是来自于数据A的mini和regular米粒的分形维数; (c)和(d)分别是来自于数据B的mini和regular米粒的分形维数

Figure 7 (Color online) The logarithm relationship between granular perimeter and area. (a) and (b) are the fractal dimension of mini and regular granules from data set A; (c) and (d) are the fractal dimension of mini and regular granules from data set B

表 1 分形维数对比表

Tabel 1 Comparison of fractal dimension

参考文献	Small granules (<1000 km)分形维数	Large granules (>1000 km)分形维数
[4]	1.25	2.15
[23]	1.14	1.90
[24]	1.30	~2.00
[25]	1.18	2.50
[1]	1.30	2.10
[5]	1.82 (<600 km)	
本文	Mini米粒分形维数	Regular米粒分形维数
数据A的结果	1.30	1.50
数据B的结果	1.24	1.32

区域(I, II, III)用以展示不同识别方法的结果. 图8(b)和(c)为采用强度阈值的识别结果. 这里分别选取了2个阈值($1.01I_0$ 和 $1.1I_0$). 从图中可以发现, 对于那些对比度比较大的米粒结构都能很好地识别出来, 对I和II区内的暗弱米粒特征, 这2个阈值都未能很好地识别. 图8(d)和(e)是标记分水岭方法的识别结果, 这里也是选择了2个阈值(0.4, 0.36). 从实验结果来看,

出现的问题同强度阈值的方法一样, 对于那些暗弱或者边缘较模糊的米粒特征未能很好地识别. 图8(f)和(h)是采用本文所提算法的识别结果, 这里也选择了3个阈值(0.0, 0.05, 0.1)来提取米粒特征. 从这3个图中可以发现, 图8(a)所标记的3个区域中的暗弱特征都被很准确地识别出来. 从这3个阈值分割结果来看, 3个阈值的识别结果并未有明显的差别. 但从视觉来看,

图8 (网络版彩色)对比试验的结果. (a) 在图1(b)中用白色矩形框标记的区域, 尺度是 400×400 pixels; (b) $1.01I_0$ 强度阈值的分割结果; (c) $1.1I_0$ 强度阈值的分割结果, 这里 I_0 是光球平均强度; (d) 标记分水岭的分割结果(阈值为 0.4); (e) 标记分水岭的分割结果(阈值为 0.36); (f)~(h) 本文所提算法识别结果. 这里分别选取了 0.0(f), 0.05(g)和 0.1(h)阈值的分割结果

Figure 8 (Color online) (a) Part of the original image from marked in Figure 1(b), whose scale is 400×400 pixels; (b) the result with $1.01I_0$ intensity threshold; (c) the result with $1.1I_0$ intensity threshold; (d) the result of marker-controlled watershed, in which 0.4 gradient threshold is selected; (e) the result of marker-controlled watershed, where the threshold is 0.36; (f)~(h) the result obtained by the proposed method, in which the threshold 0.0 (f), 0.05 (g) and 0.1 (h) is selected, respectively

阈值0.05的结构要好于0.0和0.1阈值的分割结果. 这个结果也证明, 基于相位一致性的米粒识别算法受到阈值的影响较小. 通过以上的对比试验, 验证了相位一致性方法在识别米粒上是有效的.

4.2 阈值讨论

为了验证不同阈值是否对米粒分类依据产生影响, 接下来分别选取了2个阈值(0.0和0.1)来提取数据A中的米粒结构, 并同0.05(本文采用的)的阈值进行比较来验证不同阈值选取对统计结果的影响. 统计结果如图9所示, 其中实折线代表0.05阈值下米粒分布直方图, 虚线代表0阈值的统计结果, 点虚线则代表0.1阈值的统计结果. 从统计结果来看, 这3个阈值的统计分布也不无明显的差异. 这一结论验证了所提出的算法对阈值的选取并不是十分敏感.

5 总结

太阳表层的米粒是由于太阳本身对流运动所产生的一种现象, 研究米粒可以更好地理解太阳表层

图9 (网络版彩色)数据A不同阈值下的米粒等效直径分布图. 实线代表阈值为 0.05 时的直径分布, 虚线则是指阈值为 0 时的直径分布, 点虚线是阈值为 0.1 时的直径分布

Figure 9 (Color online) Histogram of granular equivalent diameter for different thresholds from data set A. The solid curve shows the equivalent diameter distribution when threshold is set to 0.05, the dotted one indicates the threshold 0.0, and pot curve shows the threshold 0.1 in data set A

对流运动的物理机制以及和磁场活动之间的相互关系. 准确的米粒识别方法对于研究米粒的形态特征

和物理机制至关重要。然而, 由于米粒组织结构杂演化过程中强度分布不均匀、边缘模糊等问题, 使得传统基于强度和梯度的识别方法面临困境, 因此本文提出基于相位一致性的米粒识别算法。为了展示和验证所提算法的准确性和健壮性, 利用中国云南天文台抚仙湖观测基地NVST所获取两组高分辨率的TiO图像来展示所提的识别算法, 并根据识别结果对米粒的形态特征进行的分析。本文从3个方面来验证所提算法的准确性和健壮性: (1) 选取了2个已有的

识别方法同所提算法进行了对比试验。试验结果证明, 所提算法不但能很好地识别高对比度, 边缘清晰的米粒组织, 对于那些低对比度, 边缘模糊的米粒特征也能很好地识别; (2) 通过选取不同阈值验证了所提算法对阈值的响应并不敏感, 验证了算法的健壮性; (3) 通过对时间序列图像的统计结果来看, 所获得的统计结果很好的同已有文献结论相符合。这也进一步验证所提算法的识别结果是可靠的, 可以用于进一步的科学研究。

致谢 感谢中国科学院云南天文台抚仙湖太阳观测基地提供的高分辨观测资料。

参考文献

- Hirzberger J, Vázquez M, Bonet J A, et al. Time series of solar granulation images. I. Differences between small and large granules in quiet regions. *Astrophys J*, 1997, 480: 406–419
- Berrilli F, Consolini G, Pietropaolo E, et al. 2-D multiline spectroscopy of the solar photosphere. *Astron Astrophys*, 2002, 381: 253–264
- Steffen M, Ludwig H G, Kruess A. A numerical simulation study of solar granular convection in cells of different horizontal dimension. *Astron Astrophys*, 1989, 213: 371–382
- Roudier T H, Muller R. Structure of the solar granulation. *Sol Phys*, 1986, 107: 11–26
- Abramenko V I, Yurchyshyn V B, Goode P R, et al. Detection of small-scale granular structures in the quiet sun with the New Solar Telescope. *Astrophys J Lett*, 2012, 756: L27
- Yu D R, Xie Z X, Hu Q H, et al. Properties of granules in upflows and downflows. *Sol Phys*, 2011, 273: 1–13
- Yu D R, Xie Z X, Hu Q H, et al. Physical properties of large and small granules in solar quiet regions. *Astrophys J*, 2011, 743: 129–138
- Title A M, Tarbell T D, Topka K P, et al. Statistical properties of solar granulation derived from the SOUP instrument on Spacelab 2. *Astrophys J*, 1989, 336: 475–494
- Schrijver C J, Hagenaar H J, Title A M. On the patterns of the solar granulation and supergranulation. *Astrophys J*, 1997, 475: 328–337
- Berrilli F, Moro D D, Florio A, et al. Segmentation of photospheric and chromospheric solar features. *Sol Phys*, 2005, 228: 81–95
- Bovelet B, Wiehr E. A new algorithm for pattern recognition and its application to granulation and limb faculae. *Sol Phys*, 2001, 201: 13–26
- 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
- Xu Z, Jin Z Y, Xu F Y, et al. Primary observations of solar filaments using the multi-channel imaging system of the New Vacuum Solar Telescope. *IAU*, 2013, 8: 117–120
- Wang R, Xu Z, Jin Z Y, et al. The first observation and data reduction of the Multi-wavelength Spectrometer on the New Vacuum Solar Telescope. *Res Astron Astrophys*, 2013, 10: 1240–1254
- Morrone M, Owens R. Feature detection from local energy. *Pattern Recogn Lett*, 1987, 6: 303–313
- Kovesi P. Edges are not just steps. In: *Proceedings of the Fifth Asian Conference on Computer Vision*, 2002
- Kovesi P. Phase congruency detects corners and edges. *The Australian Pattern Recognition Society Conference: DICTA 2003*, 2003
- Feng S, Xu Z, Wang F, et al. Automated detection of low-contrast Solar features using the phase-congruency Algorithm. *Sol Phys*, 2014, 289: 3985–3994
- Feng S, Yu L, Yang Y F, et al. Identification of emission sources of umbral flashes using phase congruency. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 1001–1014
- Feng S, Zhao Y, Yang Y F, et al. Identifying and tracking of peripheral and central umbral dots. *Sol Phys*, 2015, 290: 1119–1133
- Jin C, Wang J X, Zhao M. Vector magnetic fields of solar granulation. *Astrophys J*, 2009, 690: 279–287
- Feng S, Lin J, Yang Y F, et al. Automated detecting and removing cloud shadows in full-disk solar images. *New Astron*, 2014, 32: 24–30
- Darvann T A, Kusoffsky U. Granule lifetimes and dimensions as function of distance from a solar pore region. *NATO Adv Sci Inst (ASI) Ser C*, 1989, 263: 313–323
- Greimel R, Brandt P N, Guenther E, et al. On the fractal dimension of the solar granulation. *Vistas Astronomy*, 1990, 33: 413–421
- Karpinsky V N. Properties of the solar granulation. *IAU*, 1990, 33: 67–79
- Mandelbrot B. *Fractals: Form, chance, and dimension*. WH Freeman San Francisco, 1977

Identification and morphology analysis of granules using the New Vacuum Solar Telescope Observations

HAN CuiCui, JIANG Xia, YANG YunFei, DENG Hui, WANG Feng & FENG Song

Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Information Engineering and Automation Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

Solar granulation is a plasma convective phenomenon from the solar convection zone to the photosphere, which appears as a cellular pattern on the solar surface. Morphological characteristics and evolution process of granules can help us to better understand the mechanism of the convective motion and the relationship to solar magnetic field. Therefore, an accurate identification method is crucial to study the mechanism and relationship. However, the traditional identification methods based on intensity- and gradient-threshold are very difficult to identify granules because the intensity distribution of granules is non-uniform and their boundaries appear to be blurred. In this paper, we proposed a new method based on phase congruency to identify granules and analyzed their morphological characteristics. The identification procedure includes three steps: (1) obtaining phase congruency feature from an original image; (2) obtaining binary image of phase congruency feature; (3) morphological filter to extract granule shapes. We selected two high-resolution image sequences taken from the New Vacuum Solar Telescope (NVST) at Fuxian Solar Observatory (FSO) to illustrate the identification procedure. For evaluating the accuracy of the proposed method, two traditional methods based on intensity threshold and marked watershed were compared to our method. Furthermore, we also selected three different thresholds to inspect the influence. The experiment result demonstrates that our proposed method is effective and accurate, and insensitive to those selected threshold. This demonstrates that our proposed method can be used to study granules evolution and their physical mechanism.

Using the method, a total of 165694 and 108279 granules were identified from the first and the second data sets, respectively. The diameter of each granule was first obtained, and then their distributions were exhibited. We found that the distributions of granules from the two data sets hold two obvious peaks, implying that the granules hold two different scales, and are called: mini granules whose diameters are smaller than 780 km and regular granules greater than 780 km. The four properties of the granules: diameter, mean intensity, ratio of long axis to short one, and fractal dimension were obtained from the two classes. The mean intensity of mini and regular granules approximates 1.04 times than the corresponding mean photosphere intensity. This suggests that there is no difference between mini and regular granules to the intensity feature. The ranges of the ratio of long to short axis are between 1.6–1.8, indicating that the shape of the granules seem to be elongated rather than circular. The fractal dimension of mini and regular granules is calculated by the logarithm ratio perimeter to area. The results of mini and regular granules are 1.30 and 1.50 on the first data sets and 1.24 and 1.32 on the second one, respectively. The results indicate that the fractal dimensions of the granules around sunspots range between 1.24–1.5.

NVST, granules, phase congruency

doi: 10.1360/N972015-00591