冕环的自动检测算法和宽度统计分析

宋智明^{1,2*}, 李洪波³, 屈中权^{1,2}

1. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

2. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216;

3. 洛阳师范学院空间物理研究所, 洛阳 471934

* 联系人, E-mail: szm@ynao.ac.cn

2019-09-11 收稿, 2019-11-04 修回, 2019-11-04 接受, 2019-11-05 网络版发表

国家自然科学基金(11527804, 11703087, 11903016, U1931206)资助

摘要 冕环是日冕结构的重要组成部分, 对冕环的尺寸及形态学的研究有助于我们更好地认识冕环的内部结构, 同时也为进一步理解日冕构造、日冕活动区演化、日冕加热、日冕磁场和日冕等离子体属性等相关问题提供线索. 本文以冕环的自动检测算法和基于自动检测算法的冕环宽度统计为研究目标, 首先, 提出了一种有效的基于匹配滤波和非锐化掩模增强的冕环自动检测算法. 其次, 使用所提出的算法对太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)的大气成像组件(Atmospheric Imaging Assembly, AIA)的图像和高分辨率日冕成像仪(High-resolution Coronal Imager, Hi-C)的图像中的冕环进行检测, 并将检测结果与目前性能表现较优的算法——Oriented Coronal Curved Loop Tracing(OCCULT)的检测结果进行对比, 以说明本文算法能检测到更多的冕环. 进一步地, 获得所有检测到的冕环的主轴和其局部方向, 提取、计算和统计分析了它们的横切面轮廓宽度. 最后, 得到如下结论: (1) 本文的冕环检测算法优于现存的性能较优的冕环检测算法OCCULT, 因此可以进一步用于除了冕环宽度统计以外的其他与冕环相关的科学研究中; (2) 与基于OCCULT算法的环宽统计结果相比, 大样本统计结果更具有普适性, 且证明了基于OCCULT算法的环宽统计结果对精细结构环宽样本的缺失导致其统计结果的不完整; (3) 环宽统计结果进一步证明, 相比于高分辨率的Hi-C, AIA/SDO的分辨率不足以分辨大部分的精细结构冕环.

关键词 日冕, 冕环, 匹配滤波, 检测, 统计

日冕是太阳大气的最外层, 其低日冕层中的磁压大于气压, 其上的等离子体处于低 β 状态, 导致该层中炙热的等离子体只能在磁场的束缚作用下沿着磁力线运动. 正是由于这些炙热的等离子体对磁力线的填充, 原本不可见的磁力线表现出比周围更高的亮度. 进一步地, 由于这些被填充的磁力线多表现出类环状结构, 因此太阳物理学家通常称它们为冕环. 冕环在日冕物理研究中扮演着重要作用. 例如, 当太阳活动区发生耀斑和日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)等爆发

现象时, 其周围的冕环会发生振荡, 因此太阳物理学家可以通过研究这些冕环的振荡现象获得与振荡相关的磁流体动力学波的传输^[1]和局地日冕的相关参数^[2]. 冕环的扭结和编织作用对太阳活动区的演化和能量释放起着重要作用^[3], 而且太阳物理学家可以通过冕环的扭结和编织情况判断活动区是否会爆发^[4]. 又因为冕环是日冕中磁力线的真实表象, 所以冕环已经被作为其中一种判断日冕磁场外推算法(如非线性无力磁场外推算法)是否有用的标准^[5]. 特别地, 对冕环相关问题的研

引用格式: 宋智明, 李洪波, 屈中权. 冕环的自动检测算法和宽度统计分析. 科学通报, 2020, 65: 704–717

Song Z M, Li H B, Qu Z Q. The automated detection algorithm of coronal loop and statistical analysis of its width (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 704–717, doi: [10.1360/TB-2019-0514](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0514)

究有助于太阳物理学家更好地理解日冕加热问题。例如,对同一活动区冕环在不同温度下的演化研究和冕环中炙热等离子体的流动方向的研究有助于理解日冕加热过程的源区和时标^[6]。对冕环温度分布和宽度的统计研究有助于理解日冕加热的基本单元是由宏观的可分辨的单一带结构组成还是由微观的尚未分辨的多条带结构组成^[7-9]。

冕环相关问题研究的前提条件是要从大量的EUV(extreme ultraviolet)图像中检测出感兴趣的冕环。然而,对感兴趣冕环的检测几乎都是基于人工识别的方法,而且所选取的冕环样本数量也只是整个EUV图像中冕环数量的很少一部分。因此,这些研究结果并不具有普适性。例如,Aschwanden和Boerner^[7]通过人工识别的方式选取了AIA/SDO(Atmospheric Imaging Assembly/Solar Dynamics Observatory)中的100条冕环样本,并依次研究了这些冕环样本的横切面的温度分布情况,得到了冕环横切面温度接近等温分布的结论。Brooks等人^[10]通过人工识别的方式选取了Hi-C图像中的91条冕环,并统计了这些冕环的宽度,得到了冕环的高斯宽度主要分布于117~667 km的结论。Peter等人^[11]通过人工识别的方式选取了Hi-C(High-resolution Coronal Imager)图像和其对应空间的AIA/SDO图像中的两个子区域中的冕环,并对所选取冕环的宽度进行了研究,得到冕环的宽度分布位于200~1500 km的结论。因为日冕中包含了大量的冕环,所以这些基于人工识别的小样本研究并不具有普适性。因此,冕环的自动检测算法和基于自动冕环检测算法的冕环相关科学问题的研究,特别是大样本的统计研究具有重要意义。

目前,已经存在多种冕环的自动检测算法^[12-17],但是就可识别的冕环数量和真实性而言,Aschwanden所开发的OCCULT(Oriented Coronal Curved Loop Tracing)算法表现较优,具体的性能比较详见文献^[16,17]。而且,OCCULT也是第一个被用于实际科学应用的自动冕环检测算法。例如,为了使用更大的样本研究冕环的横切面温度分布情况,Aschwanden等人^[8]使用OCCULT算法自动检测了AIA/SDO图像中的570条冕环,并对这些冕环的横切面温度分布进行了自动分析和统计,进一步验证了冕环横切面温度接近等温分布的结论^[7]。为了使用更大的样本研究冕环的横切面宽度分布情况,Aschwanden和Peter^[9]使用OCCULT算法自动检测和统计分析了AIA/SDO和Hi-C中的大量冕环宽度,得到了最频繁的冕环宽度分布于550 km的结论,这一

结论也进一步证实了Brooks等人^[10]和Peter等人^[11]的结论是基本正确的。尽管OCCULT算法相比于现存冕环检测算法检测到更多的冕环,并且首次实现了冕环大样本数据的科学研究应用,但是OCCULT对强度微弱的冕环不敏感,而且其检测冕环的连续性和完整性较差,导致其在冕环大样本的统计科学应用中得到的统计样本不充分,统计结果的普适性较差。因此,本文提出了一种性能更优的冕环自动检测算法,并基于该算法进一步实现了冕环横切面轮廓宽度的自动统计。相比于OCCULT,本文算法能够检测到更多冕环,能够获得更大的统计样本,得到更具有普适性和正确性的冕环横切面宽度统计结果和相关科学结论。同时,考虑冕环自动检测算法已经被广泛应用于太阳物理的相关研究中,本文的冕环检测算法将能在这些应用中发挥更大的作用。

1 试验数据

本文的研究内容主要涉及两个方面:其一是提出一种更加有效的冕环自动检测算法;其二是基于本文的冕环检测算法提取更多的冕环,并以这些冕环为对象,统计它们的横切面轮廓宽度分布情况,以更大的样本数据获得更具有普适性的冕环横切面宽度分布信息,并得到相关的科学结论。因此,围绕这两个研究内容,首先选择一组来自AIA/SDO和Hi-C的几乎同时间和同空间的图像,而这组图像已经被Aschwanden和Peter^[9]使用OCCULT算法进行了冕环的自动检测和环宽统计分析。之所以选择这组图像,是为了方便本文冕环检测算法和环宽统计结果直接与OCCULT算法的结果进行比较。

对于Hi-C图像,采用的是其193 Å波段的采集于2012年7月11日18:54:16 UT的全分辨率图像,像元尺寸为4096像素×3880像素,图1(a)展示了该原始图像。对于AIA/SDO图像,采用的是其193 Å波段的采集于2012年7月11日18:54:18 UT的与Hi-C几乎同一空间下的图像,像元尺寸为668像素×706像素,比Hi-C原始图像小5.8倍(AIA/SDO的像元分辨率为0.6角秒/像元,而Hi-C的像元分辨率为0.1角秒/像元),图1(b)展示了该原始图像。

此外,在冕环宽度的科学统计中,Aschwanden和Peter^[9]提出并用蒙特卡洛仿真证明了将原始冕环图像输入一组高通滤波器中(原始图像经过非锐化掩模高通减去非锐化掩模低通即为高通滤波操作,详细的双通滤波公式见文献^[9]),将高通滤波后的图像作为冕环

图 1 (网络版彩色)原始试验数据及它们的双通滤波结果。(a) Hi-C的原始图像; (b) AIA/SDO的原始图像; (c) (a)通过7个像元尺寸为 $[n_{sm1}, n_{sm2}]$ 的双通滤波器后的结果; (d) (b)通过7个像元尺寸为 $[n_{sm1}, n_{sm2}]$ 的双通滤波器后的结果

Figure 1 (Color online) Original experimental data and their filtering results based on bi-pass filters. (a) Original Hi-C image; (b) original AIA/SDO image; (c) the filtering results of (a) based on bi-pass filters with seven different pixel sizes $[n_{sm1}, n_{sm2}]$; (d) the filtering results of (b) based on bi-pass filters with seven different pixel sizes $[n_{sm1}, n_{sm2}]$

检测和宽度统计的目标图像可以获得完整的环境采样分布. 因此, 本文采用Aschwanden和Peter^[9]的方法, 将图1(a)和(b)的原始图像分别通过7个不同像元尺寸的双通滤波器进行滤波, 然后使用经过双通滤波后的图像作为冕环自动检测和宽度统计的目标图像. 图1(c)和(d)展示了这14幅图像. 需要强调的是, 7个不同像元尺寸的双通滤波器中的高通滤波器和低通滤波器的像元尺寸 n_{sm1} 和 n_{sm2} 分别为 $[n_{sm1}, n_{sm2}] = [2, 4], [4, 6], [8, 10], [16, 18], [32, 34], [64, 66]$ 和 $[128, 130]$. 这样, 图1(c)和(d)中冕环的像元宽度主要集中于 $3 \pm 1, 5 \pm 1, 9 \pm 1, 17 \pm 1, 33 \pm 1, 65 \pm 1$ 和 129 ± 1 像素之间.

为了展示通过一组像元尺度为 $[n_{sm1}, n_{sm2}] = [2^n, 2^{n+2}]$ 的双通滤波器后, 原始图像中的不同像元宽度的冕环可以被分离出来, 从而可以对原始图像中的环境分布进行统计, 在图S1中使用轮廓曲线叠加的方式给出了这个分离过程. 图S1所示实线为图1(a)原始Hi-C图像中虚线矩形框中的对角线的强度轮廓曲线, 而其他不同线型的曲线表示不同双通滤波器对原始图像滤波的结果曲线. 在图S1的实线中, 精细结构的冕环被认为是叠加在曲线大起伏上的小起伏, 如果观测设备的分辨率较低, 则精细结构的小起伏将被平滑, 只显示出大起伏, 而当观测设备分辨率较高时, 一些小于仪器分辨宽度的小起伏也可能是噪声和干扰. 因此在环宽的统计中, 轮廓曲线上的大于仪器分辨率的小起伏可以被认为是精细结构的冕环, 而较大的起伏则认为是像元宽度较大的冕环或背景强度. 从图S1可以看到, 不同像元尺度的双通滤波器可以将不同像元宽度的起伏分离出来, 因此通过对这些分离后的冕环提取和宽度统计分析, 可以得到较为完整的环境分布情况.

2 自动的冕环检测和冕环主轴及局部方向提取

图2以流程图的方式展示了自动冕环检测和环宽统计方法. 可以看到, 整个方法由6个部分构成, 其中第一部分双通滤波图像的获取已在上一节介绍, 接下来将依次介绍其余各个部分的内容.

2.1 自动的冕环检测算法

显然, 图1(a)和(b)的原始日冕图像中包含了大量冕环. 虽然这些冕环像素的强度相比其领域像素的强度要高, 但是冕环与冕环之间没有很清晰的边界, 而且许多冕环聚集在一起形成大量难以分割的环簇. 特别地,

图2 (网络版彩色) 本文所采用的自动冕环检测和宽度分析方法
Figure 2 (Color online) The method of detecting coronal loop and analyzing its width

在冕环足点附近, 由于图像强度较高, 干扰结构较强, 冕环之间的边界更加难以区分. 正是由于以上这些特点, 常用的图像分割方法很难从原始日冕图像中自动和高效地检测出冕环. 尽管前面所述的双通滤波器可以增强特定像元宽度的冕环(如图1(c)和(d)), 但是要从这些增强的图像中分割出每一根独立的冕环并进行宽度自动统计还是比较困难(需要说明的是, 图1(a)和(b)原始图像中的高亮条带表示冕环, 而图1(c)和(d)双通滤波器图像中, 为了与OCCULT算法进行对比, 图像进行了反色, 即条带表示冕环).

根据文献[7~11]可知, 大部分的冕环横切面轮廓较好地符合高斯型结构, 且对于每一条独立的冕环, 虽然其可能有一定的弯曲半径, 但是沿着其扩展方向, 其横切面宽度变化很小. 因此, 首先使用分段线性化的二维高斯函数构造每一条独立的冕环(图3显示了一条独立冕环的分段线性化模型), 而对于每一个分段线性化的部分, 其二维高斯函数如下:

$$f_i(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad \forall |y| \leq \frac{L}{2}. \quad (1)$$

如图3所示, 较粗的实线表示一条独立的冕环, 其由15个分段线性化的部分组成, 而对于每一个分段线性化的部分, L 为分段线性化的长度, x 为分段线性化的

图3 (网络版彩色)分段线性化的冕环建模

Figure 3 (Color online) The modeling of piecewise linearized coronal loop

冕环水平方向上的坐标到其中心的距离, σ 与分段线性化的冕环的半宽有关。

显然, 通过式(1)可以获得一个冕环段的函数形式。而对于冕环检测, 目的是将所有的冕环结构(大量的冕环段)从图像中分割出来。换言之, 如果能够把已知函数形式(式(1))的冕环的函数值相比于干扰结构进一步增强, 就容易把冕环从图像中分割出来。

匹配滤波技术是一种有效的信号增强技术, 能够最大化输入信号中的有用信号的信噪比, 但前提条件是输入信号中的有用信号的函数形式是已知的^[18,19]。在式(1)中, 已经知道了一个冕环段的函数形式, 那么就可以利用匹配滤波技术进一步增强日冕图像中的所有冕环段结构, 并抑制非冕环干扰结构。

根据匹配滤波技术的原理可知, 当输入信号的函数形式已知时, 为了最大化输出信号的信噪比, 匹配滤波器的函数应该满足以下形式^[18]:

$$h(x, y) = f_i(x_0 - x, y_0 - y), \quad (2)$$

其中, $h(x, y)$ 为匹配滤波器的函数, $f_i(x, y)$ 为输入信号中的已知函数形式的有用信号, 坐标 (x_0, y_0) 为有用信号将被增强的位置。

从式(2)可知, 匹配滤波器的函数形式为有用信号的反转和平移。回到冕环增强问题, 冕环段的函数形式如式(1)所示, 由式(2)可以得到用于冕环增强的匹配滤波器的公式为

$$h(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad \forall |y| \leq \frac{L}{2}. \quad (3)$$

对于中心对称的高斯函数而言, 其函数的反转仍然是高斯函数; 而对于二维图像中的冕环而言, 其增强

点为冕环所在原始位置, 因此 $(x_0, y_0) = (0, 0)$ 。

根据式(3)可以得到用于增强冕环结构的匹配滤波器。但需要注意的是, 式(3)只能增强某一个特定方向的冕环段, 而从图1(a)~(d)可以看到, 不同的冕环段在图像中的方向并不是固定的。因此, 为了增强所有方向的冕环段, 必须对式(3)进行旋转, 每旋转一个角度构造一个匹配滤波器, 然后使用构造的所有匹配滤波器对原始日冕图像进行卷积, 并求所有卷积操作的最大值, 该最大值即所有方向的冕环的增强结果。因此要增强图像中所有的冕环结构, 首先需要旋转式(3)的匹配滤波器 N 次, 构造可增强 N 个特定方向冕环的匹配滤波器:

$$h_i = (u_i, v_i) = hr_i \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

其中, $h = (x, y)$ 表示式(3)中没有旋转的原始滤波器 h 的坐标向量; $h_i = (u_i, v_i)$ 为旋转后的滤波器 h_i 的坐标向量; r_i 为旋转矩阵, 该旋转矩阵如式(5)所示, N 为旋转的步数(为了覆盖所有方向的冕环, 旋转步数取为 $N = \lceil 180/\theta_i \rceil$, 其中 θ_i 为式(5)的旋转角度)。每旋转一步就构造一个对应的匹配滤波器, 总共需要构造 N 个不同方向的匹配滤波器。需要强调的是, 匹配滤波器的高斯函数只取 3σ 范围的宽度, 因此旋转后的坐标向量 $h_i(u_i, v_i)$ 的范围应该限制在 $R_i = \{(u_i, v_i) \mid |u_i| \leq 3\sigma, |v_i| \leq L/2\}$ 内。

$$r_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

同时, 为了使匹配滤波器尽量抑制非环状结构, 希望非环状区域的滤波器输出结果尽量接近0, 因此滤波器函数应该满足:

$$\tilde{h}_i(u, v) = h_i(u, v) - m_i \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

其中, $m_i = \frac{\sum_{(u,v) \in R_i} h_i(u, v)}{n}$, n 是滤波器的离散点的数量。

通过对原始匹配滤波器函数(式(3))进行式(4)~(6)的变换, 即可以得到 N 个不同方向的匹配滤波器。然后分别对双通滤波器输出的日冕图像(如图1(c)和(d))进行 N 次卷积, 并求取 N 次卷积的最大值, 即可以将图像中的冕环增强。该匹配滤波技术的卷积操作可以表示如下:

$$I_o(x, y) = \max\{I_{in}(x, y) \times \tilde{h}_i(u, v)\} \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

其中, $I_o(x, y)$ 为匹配滤波的输出, 该输出包含了增强的冕环结构; $I_{in}(x, y)$ 为输入的图像; $\tilde{h}_i(u, v)$ 为式(6)的滤波

器函数。

从式(3)~(7)可以看到,用于冕环进一步增强的匹配滤波器具有3个可调参数,分别是 σ 、 L 和 θ_i 。为了尽量多地增强图像中的冕环,需要合理地选择这3个参数。 σ 与冕环半宽有关。 L 的选择需要考虑冕环具有一定的弯曲半径,因此 L 不能过长,但是 L 过小又会使得滤波结果对小的类环状干扰结构敏感。 θ_i 过小会导致过多的匹配滤波器需要被构造,影响算法的时间,但太大会导致某些方向的冕环无法增强。由前文可知,为了获得完整的环境采样范围,冕环检测和环宽统计的目标图像是图1(c)和(d)所示的图像。根据双通滤波器像元尺寸和对应的敏感环宽,可以确定增强图1(c)和(d)所用的匹配滤波器的 σ 值。而对于 L 和 θ_i ,不同的图像是完全相同的。基于以上分析和试验,确定了增强图1(c)和(d)的匹配滤波器的参数(表1)。可以看到, σ 是不同的,但是 θ_i 和 L 是相同的。

此外,为了展示匹配滤波器能进一步提高冕环信

噪比,选择图1(d1),即双通滤波器的像元尺寸为 $[n_{sm1}, n_{sm2}]=[2,4]$ 的图像(对应表1中的敏感环宽为 3 ± 1 个像元,匹配滤波器参数为 $\sigma=0.5$, $L=20$, $\theta_i=6$)进行冕环信噪比增强,图4(a)展示了该增强结果。显然,相比于图1(d1),增强后图像的类环状结构更容易分辨。特别地,原图中微弱的条带结构在图4(a)中都能清晰地辨认出来。

由图2可以看到,为了实现冕环自动检测,需要经过匹配滤波器增强、非锐化掩模增强和全局阈值分割三个步骤。

图4(a)几乎增强了所有的类环状结构,但是对于将要进行的自动环宽统计而言,为了获得尽量多的冕环横切面轮廓,要求冕环自动检测算法获得的冕环应该尽可能为连续类环状结构。对于图4(a)的增强结果而言,直接使用全局阈值对其进行分割以检测图像中的冕环不仅得不到较为连续的冕环(包含较多的离散点),而且由于冕环足点附近的强度较高(图4(a)中的高亮结构),其上的冕环结构很难被直接用阈值分割。因此,使

表1 冕环检测和横切面轮廓提取算法的相关参数选择

Table 1 The selection of parameters associated with the algorithm of detecting coronal loop and analyzing its width

双通滤波器输出结果的敏感环宽(像元)	σ (像元)	L (像元)	$\theta_i(^{\circ})$	非锐化掩模增强的滤波器维度 n_{sm} (像元)	轮廓提取的滤波器核宽 k (像元)
3±1	0.5	20	6	3	7
5±1	0.8	20	6	5	9
9±1	1.5	20	6	9	13
17±1	2.8	20	6	17	21
33±1	5.5	20	6	33	37
65±1	10.8	20	6	65	69
129±1	21.5	20	6	129	133

图4 匹配滤波器对图1(d1)的增强结果及增强结果的分割和细化。(a)增强;(b)分割;(c)细化

Figure 4 The enhancement result of Figure 1 (d1) based on matched filtering and the segmentation and thinning results after enhancement. (a) Enhancement result; (b) segmentation result; (c) thinning result

用非锐化掩模增强技术进一步增强. 对于非锐化掩模增强, 其类似于前文介绍的双通滤波器, 但是其只使用双通滤波器中的一个滤波器. 其公式如下:

$$I_F(x, y) = I_0(x, y) - \text{smooth}[I_0(x, y), n_{sm}], \quad (8)$$

其中, $I_0(x, y)$ 为匹配滤波器输出的结果(如图4(a)所示的图像); $\text{smooth}[I_0(x, y), n_{sm}]$ 表示对匹配滤波器输出的结果进行均值滤波, 其中均值滤波器的维度为 $n_{sm} \times n_{sm}$, 而 n_{sm} 的大小与所增强的冕环宽度有关. 本文需要对图1(c)和(d)所有经过匹配滤波器后的图像进行增强, 因此类似于匹配滤波器的参数选择, 非锐化掩模增强中, 不同的输入图像也需要不同的滤波器维度值. 对此, 在表1中给出了不同图像所使用的不同非锐化掩模的滤波器维度值. 对于图4(a)的增强, 滤波器维度值为 $n_{sm}=3$.

对图4(a)进行非锐化掩模增强后, 图像中类环状结构的值都大于0, 而非环状结构的值都小于0, 因此可以使用全局阈值分割出图像中的冕环. 本文中取全局阈值为3. 图4(b)显示了对图4(a)进行冕环分割的结果. 可以看到, 几乎所有的环状结构都被检测到了, 但是在高亮点附近仍然存在一些小的干扰结构.

2.2 冕环主轴及局部方向提取

图3所示的分段线性化的冕环模型除了展示分段线性化冕环函数建模外, 还展示了冕环的主轴(长虚线)和垂直于主轴的横切面轮廓(垂直于长虚线的短虚线及其对应的类高斯型强度轮廓曲线). 显然, 为了自动获得冕环横切面轮廓宽度, 首先需要提取冕环主轴, 然后获取以主轴为中心, 垂直于主轴方向一定宽度的图像强度轮廓, 再根据图像强度轮廓计算冕环宽度. 图5(b)的分割结果已经将冕环从原始日冕图像中分割出来了. 但是, 为了获得冕环主轴, 需要细化分割后的冕环. 采用形态学细化提取二值图像骨架的方法实现这一过程. 图4(c)展示了对图4(b)进行细化, 以提取主轴的结果. 显然, 图4(c)与图4(b)相比, 每一根冕环只包含了细化后的主轴, 而且图4(c)消除了大部分干扰结构(对细化后的图像去除毛刺后求取连通域, 然后将连通域像素个数小于5的区域丢弃). 需要强调的是, 尽管图4(c)的主轴提取结果使得一些完整的冕环发生了断裂, 但是这种断裂并不影响冕环的横切面轮廓的提取和宽度计算, 仅仅会丢失很少的几个轮廓采样点数据.

提取冕环主轴后, 需要提取以主轴为中心, 垂直于主轴的冕环横切面轮廓. 这就需要知道冕环主轴每一

个像素的局部方向和其对应的垂直方向, 然后提取垂直方向一定范围内的图像. 对于冕环主轴像素的局部方向的求取, 首先构造如图5(a)所示的 13×13 的滤波器核. 该滤波器核中, 除了中心宽度 $w=1$ 、径向长 $p=13$ 的像素值为1外, 其他像素值都为0. 然后, 以 5° 为步长顺时针旋转 180° (如图5(b)所示, 旋转公式类似于式(4)和(5)), 构造36个滤波器核 $k_1(i, j) \sim k_{36}(i, j)$, 对图4(c)所示的冕环主轴图像进行滤波, 并以36次滤波结果的最大值对应的滤波器序号(1~36)作为输出, 得到冕环主轴中每一个像素的局部方向. 以上局部方向求取的过程如下:

$$\text{imd}(x, y) = \max[I_S(x, y), k_n(i, j)]_{s_n} \quad n = 1, 2, \dots, 36, \quad (9)$$

其中, $I_S(x, y)$ 是冕环主轴图像; $k_n(i, j)$ 是滤波器; $\max[\]_{s_n}$ 是求取36次滤波最大值对应的滤波器序号的操作, 该操作的输出结果中, 每一个非零像素的范围为1~36, 表示每一个冕环主轴的像素的局部方向为 $0^\circ \sim 175^\circ$.

图S2展示了图4(c)中冕环主轴的局部方向, 其中图S2(a)右侧的颜色棒显示了这些像素的局部方向位于1~36之间, 分别对应 $0^\circ \sim 175^\circ$. 图S2(b)是垂直于图S2(a)的局部方向图, 其垂直方向是通过图S2(a)的非0像素加19(90°)得到的.

3 冕环横截面轮廓提取和宽度计算

图S2(b)获得了冕环主轴中每一个像素的垂直方向, 其方向值的范围为1~36, 这些方向值的获得与图5所示的滤波器核直接相关. 假设图S2(b)中某个冕环主轴的像素的局部方向值为1, 即垂直于该主轴像素的方向为 0° , 而该方向对应图5(a)的滤波器核(没有旋转的初始滤波器核). 可以将该主轴像素当作图5(a)滤波器

图5 冕环主轴局部方向提取的滤波器核. (a) 初始滤波器核; (b) 滤波器核的旋转

Figure 5 The filters of extracting local directions of main axes of coronal loops. (a) The original filter; (b) the rotation process of original filter

核的中心像素 o , 而垂直于该主轴像素的冕环横切面轮廓像素可以根据中心位置 o 以外的其他非零像素相对于中心非零像素 o 的位置进行坐标变换获得. 需要强调的是, 图5中滤波器核的维度为 13×13 , 即滤波器核中有13个非零像素, 所以用该滤波器核的坐标转换得到的冕环横切面轮廓将由13个像素构成. 而本文冕环宽度统计的目标图像(图1(c)和(d))的环宽是变化的, 因此类似于匹配滤波器的参数选择, 在表1中也给出了不同目标图像需要提取的不同横切面轮廓像素个数, 即轮廓提取的滤波器核宽 k .

在提取垂直于冕环主轴的横切面轮廓像素后, 需要计算横切面轮廓宽度. 采用横切面轮廓强度积分除以横切面最大强度的方法来获取横切面等效半峰全宽(full width at half maximum, FWHM), 该方法也被Aschwanden和Peter^[9]在基于OCCULT的环宽统计中使用(因为少部分冕环的横切面轮廓可能不符合高斯型, 如果使用高斯拟合横切面轮廓并计算高斯函数FWHM的方法获取冕环横切面等效宽度, 会使得某些不符合高斯型冕环的横切面宽度的计算存在误差, 所以采用式(10)的方法), 其公式如下:

$$w = \frac{\int_1^k F(r) dr}{\max[F(r)]}, \quad (10)$$

其中, w 为计算所得的冕环宽度, $F(r)$ 为冕环横切面轮廓强度函数, 由 k 个像素点构成(不同双通滤波图像的 k 值

已经在表1中给出), 因此其积分范围为 $[1, k]$, $\max[F(r)]$ 是求取 k 个数据点的最大值强度.

图6(a)给出了冕环检测和横切面轮廓提取的示意图, 叠加了所提取的冕环主轴(图4(c)的结果)和垂直于主轴, 且总宽度为7个像素的冕环横切面轮廓提取范围. 图6(b)中左侧是图6(a)中小矩形框所包围部分的放大图(图中较亮的像素点为实际的冕环横切面轮廓像素), 垂直于较亮像素点的线条为7个像素的冕环横切面轮廓提取范围. 图6(b)中右侧为左侧3个位置标号(1, 8和16)提取的横切面轮廓图, w 表示通过式(10)计算得到的冕环宽度. 通过图2所示方法可以实现冕环宽度的自动统计.

4 检测结果对比与环宽统计分析

Aschwanden和Peter^[9]给出了OCCULT算法对Hi-C和AIA/SDO图像中的冕环检测的结果, 而这些被检测的目标图像也就是图1(c)和(d)中所展示的图像. 将本文的检测结果直接叠加在图1(c)和(d)所示的原始图像中(图7(a)和(c)), 而其对应的OCCULT的检测结果见图7(b)和(d)^[9]. 可以看到, 本文的检测算法相比于OCCULT检测到了更多的冕环. 特别地, 本文算法能够检测到更加微弱的冕环(在图7(a)和(c)中使用箭头将一部分有明显条带轨迹, OCCULT的图7(b)和(d)检测不到, 而本文算法能检测到的冕环标记出来). 而且, 就检测到的冕环的完整性和连续性而言, 本文算法明显优于OCCULT算法. 此外, 如果用该算法进行自动冕环检测, 并基于

图6 (网络版彩色)冕环横切面轮廓提取和宽度计算. (a) 冕环主轴和横切面轮廓叠加图; (b) 冕环横切面轮廓和宽度计算
Figure 6 (Color online) Contour extraction and width calculation of coronal loop. (a) The superposition of main axes and cross-section profiles of coronal loops; (b) the cross-section profiles of coronal loops and their width calculation

图 7 (网络版彩色) 本文的冕环检测算法与 OCCULT 算法对图 1(c) 和 (d) 的不同像元尺寸的双通滤波器输出图像的冕环检测结果. (a) 本文的冕环检测算法对图 1(c) 的检测结果, (b) OCCULT 算法对图 1(c) 的检测结果. (c) 本文的冕环检测算法对图 1(d) 的检测结果, (d) OCCULT 算法对图 1(d) 的检测结果. (e) 本文的冕环检测算法对图 1(c) 和 (d) 的检测结果的差值. (a) The detection results of the proposed algorithm for Figure 1 (c); (b) the detection results of the proposed algorithm for Figure 1 (d); (c) the detection results of the proposed algorithm for Figure 1 (c); (d) the detection results of the proposed algorithm for Figure 1 (d); (e) the difference results of the proposed algorithm for Figure 1 (c) and (d).

自动冕环检测的结果进行冕环横切面宽度统计分析, 将获得更具有普适性的结果。

基于图7(a)和(c)所示的冕环检测结果, 分别对图1(c)和(d)图像中的冕环宽度进行统计分析。在图1(c)的7幅Hi-C图像中总共提取了929064条冕环横切面轮廓, 而在图1(d)的7幅AIA/SDO图像中总共提取了95551条冕环横切面轮廓。相对应的, 从文献[9]可以知道, OCCULT算法提取了图1(c)的Hi-C中的138965条冕环横切面轮廓, 图1(d)的AIA/SDO中的20927条冕环横切面轮廓。因此, 就统计样本数量而言, 本文算法明显优于OCCULT。图8(a)和(b)分别显示了图1(c)和(d)的冕环横切面轮廓宽度统计直方图和其对应的拟合曲线。可以看到, 对于Hi-C的冕环而言, 最频繁出现的环宽为3个像素; 而对于AIA/SDO的冕环而言, 最频繁出现的环宽为2.65个像素。形成对比的是, 在OCCULT的环宽统计中, Hi-C的数据得到的最频繁的环宽为7.1个像素, 而AIA/SDO的数据得到的最频繁的环宽为3.1个像素。显然, 本文的统计结果要比OCCULT的统计结果偏小, 造成这种结果的原因可以从图7的冕环检测结果中得到解

释。对于OCCULT的冕环检测结果而言, 其对精细结构的冕环检测数量明显少于大尺度冕环的检测数量(即图7(b)和(d)中的(b1)和(b2)与(d1)和(d2)中的小尺度冕环图像中检测到的冕环数量较少), 这就导致其获得的最终冕环宽度统计分布直方图最频繁的冕环宽度偏大。而本文的统计结果中, 对于大小尺度的冕环统计都是比较全面的, 包含了目标图像中的绝大部分冕环(如图7(a)和(c)中的叠加线条几乎覆盖了目标图像中的绝大部分冕环), 因此本文结果更能真实地反映Hi-C和AIA/SDO中冕环尺度的分布情况。为了验证这种说法的正确性, 首先在图S3(a)中展示了最精细冕环图像图1(c1)经过匹配滤波器增强后的结果, 可以清晰看到, 图中存在高亮区域, 而这些区域也是其他大尺度检测结果中冕环出现最多的区域。其次, 将该最精细结构的冕环检测结果的子区域(图7(a1)的矩形框区域)放大(图S3(b)), 可以看到, 检测到的表示冕环的线条是叠加在深黑色的精细长结构上, 而非随机噪声上, 而且这些深黑色的精细长结构的宽度基本分布于3个像素左右。进一步地, 将图8(a)和(b)的环宽统计直方图中最精细环宽的

图8 (网络版彩色)本文算法的环宽统计直方图和删除其中最精细冕环的环宽统计直方图。(a) Hi-C图像的环宽统计直方图; (b) AIA/SDO图像的环宽统计直方图; (c) 删除(a)最精细冕环的环宽统计直方图; (d) 删除(b)最精细冕环的环宽统计直方图

Figure 8 (Color online) The statistical histogram of coronal loops' width of the proposed algorithm in which the finest coronal loops are included or excluded. (a) The statistical histogram of coronal loops' width of Hi-C; (b) the statistical histogram of coronal loops' width of AIA/SDO; (c) the statistical histogram of coronal loops' width of (a) without the finest coronal loops; (d) the statistical histogram of coronal loops' width of (b) without the finest coronal loops

统计结果删除,即对于图7(a)的Hi-C的数据而言,环宽统计结果不包括图7(a1)和(a2)的统计结果,而对于图7(c)的AIA/SDO的数据,环宽统计结果不包括图7(c1)的统计结果.删除精细结构的冕环后得到的环宽统计结果如图8(c)和(d)所示.可以看到,由于删除了最精细的环宽统计,最频繁出现的环宽变大了(Hi-C的最频繁的环宽变为4.85个像元,而AIA/SDO的最频繁的环宽变为3.54个像元),这个结果和OCCULT的统计结果(Hi-C的最频繁的环宽为7.1个像元,而AIA/SDO的最频繁的环宽为3.1个像元)很相似.

根据以上试验结果,可以得到以下结论:(1)本文提出的冕环检测算法超过了目前性能较优的冕环检测算法;(2)本文的冕环宽度统计结果更具有普适性,且证明了OCCULT算法的环宽统计结果对精细结构环宽样本的缺失导致统计结果的不完整(这主要是由OCCULT算法本身所限制的,因为该算法的冕环跟踪和停止的标准是图像强度,而精细结构和微弱的冕环图像中的整体强度较为微弱和近似,导致OCCULT跟踪不到精细和微弱的冕环).

进一步地,根据文献[9]可知,Hi-C和AIA/SDO的仪器点扩散函数都为 $w_{\text{psf}}=2.5$ 个像元,而图像的双通滤波会使得环宽测量的结果存在一个像元范围内的不确定度,即 $w_{\text{noise}}=\pm 1$,因此理论计算得到的Hi-C和AIA/SDO的可分辨的冕环结构的宽度应该 $[(w_{\text{psf}})^2+(w_{\text{noise}})^2]^{1/2}=2.7$ 个像元(即2.7个像元的结构才最有可能是真实结构,否则可能是背景干扰或者噪声干扰等其他原因引起的非真实结构).根据本文的统计结果,Hi-C的最频繁出现的冕环宽度分布于3个像元附近,且 >2.7 个像元的环宽数量(图8(a)和(b)的垂直实线)占据整个统计结果的绝大部分,而AIA/SDO的最频繁冕环宽度分布于2.65个像元附近,且 >2.7 个像元的环宽数量大约只占据整个统计结果的一半,因此可以推断AIA/SDO的分辨率无法分辨大部分的冕环结构,而Hi-C的分辨率能够分辨大部分冕环结构.这种结论和文献[3,10,11]的结论完全一致.此外,虽然基于OCCULT的环宽统计获得了Hi-C中最频繁的环宽为7.1个像元,而AIA/SDO中最频繁的环宽为3.1个像素,并且同样认为AIA/SDO的分辨率难以分辨大部分冕环,而Hi-C的分辨率可以分辨大部分冕环,但是本文的结果更具有说服力.

5 总结和讨论

冕环是日冕磁场最直观的反应,而太阳的各种活

动现象都与磁场息息相关,因此对冕环及其相关科学问题的研究有助于更好地理解太阳物理的相关问题.尽管冕环及其科学问题的研究具有重要意义,但是目前对它们的研究主要集中在单目标或者小样本的统计分析上,这主要是由于冕环自动检测算法及基于自动检测算法的科学问题研究滞后于冕环相关科学问题的理论研究.鉴于以上原因,Aschwanden提出了一个性能较优的冕环自动检测算法OCCULT,并基于该算法进行了大量的与冕环相关的科学问题研究.例如,以OCCULT算法检测的冕环为基础,首次实现了大样本冕环的温度分布分析[8];以OCCULT算法检测的冕环为约束条件,首次实现了基于自动冕环检测算法的具有约束条件的日冕磁场外推算法[20];以OCCULT算法检测的冕环为基础,首次对冕环横切面轮廓宽度进行了大样本统计分析[9];以OCCULT算法检测的冕环和色球纤维结构为基础,首次分析了这些结构与外推磁场之间的错位角,并用于约束外推磁场算法[21].显然,Aschwanden在冕环自动检测算法及基于自动检测算法的冕环相关科学问题研究中开创了很多先河.但是,由于OCCULT算法本身的特点,其对于一些微弱的冕环不够敏感,而且其检测的冕环的完整性和连续性不理想,因此其仍然需要进一步的改进.鉴于此,本文提出了一种更加有效的冕环检测算法,并基于该检测算法的优秀性能进行了更大样本的冕环横切面轮廓宽度的统计研究.试验结果和对比分析进一步证明了本文提出的冕环自动检测算法具有比OCCULT更优的性能,并且统计得到的冕环横切面轮廓宽度分布具有更好的普适性,同时统计结果更好地证明了Hi-C的分辨率能够分辨绝大部分的冕环结构,而AIA/SDO的分辨率不足以分辨绝大部分的冕环结构,这符合已有研究的相关结论,能够为未来的日冕望远镜的分辨率提供约束条件.同时,对于“Hi-C的分辨率可以分辨大部分冕环结构”的结论也支持了日冕加热模型中的微观不可分辨的磁重联加热模型是欠妥的,而宏观可分辨的磁重联加热模型是妥当的[6,9].两种加热模型的本质区别是加热的基本单元冕环的横切面尺寸(重联磁流管的横切面尺寸)使用当前的观测仪器是否可以分辨,即观测得到的冕环横切面宽度是否大于仪器分辨率.从图8(a)Hi-C的环宽统计分布中可以看到,大部分的冕环宽度都大于仪器分辨率,因此这种统计结果与微观不可分辨的磁重联加热模型是相驳的.进一步地,Hi-C像元分辨率为0.1角秒/像元.从图8(a)可以看到,最频繁的冕环宽度位于

$3 \times 72.5 \text{ km} \approx 217 \text{ km}$ 附近, 该宽度范围与光球对流元胞米粒的尺度是基本相称的^[9], 而光球米粒的对流运动被认为是磁重联过程的驱动源. 在可分辨的磁重联加热模型中, 人们希望作为驱动源的米粒的尺寸应该与冕环横切面尺度基本一致, 因此这也支持了宏观可分辨的加热模型的合理性. 关于两种加热模型是否合理的讨论可以进一步参见文献^[6,9]. 此外, 文献^[22]基于磁重联的日冕加热机制发展了一个利用磁场的观测数据进行约束的日冕结构模型. 在该模型中, 将冕环(重联磁流管)的横截面的尺寸设定为 160 km (该尺寸接近Hi-C的分辨率: 假设不考虑其他外部干扰, Hi-C的点扩散函数为2.5个像元, 相当于 $2.5 \times 72.5 \text{ km} \approx 181 \text{ km}$), 佐证了磁重联模型可以提供活动区日冕所需要的加热功率,

并产生在定性和定量上都能够与观测比拟的日冕模型. 这也说明我们通过Hi-C可分辨大部分冕环的统计结果得出支持宏观可分辨的磁重联加热模型的结论是妥当的.

此外, 由于本文所提出的自动冕环检测算法具有优良性能, 如果能将其应用到更多的与冕环相关的科学问题研究中, 将会获得更多有意义的科学结论(如冕环的自动三维重构^[23,24]), 这也是开发太阳特征图像自动检测算法的主要目标.

随着各种天基太阳观测设备和地基太阳观测设备的投入使用, 太阳物理学家们正面临着巨大的数据分析压力, 而从这些海量数据中快速有效地获得有意义的科学结论将有助于推动太阳物理研究更好更快发展.

参考文献

- 1 Li H, Liu Y, Tam K V. Fundamental and harmonic oscillations in neighboring coronal loops. *Astrophys J*, 2017, 84: 99–103
- 2 Aschwanden M J, Schrijver C J. Coronal loop oscillations observed with AIA: Kink-mode with cross-sectional and density oscillation. *Astrophys J*, 2011, 736: 102–143
- 3 Cirtain J W, Golub L, Winebarger A R, et al. Energy release in the solar corona from spatially resolved magnetic braids. *Nature*, 2013, 493: 501–503
- 4 Aschwanden M J. Helical twisting number and braiding linkage number of solar coronal loops. *Astrophys J*, 2019, 874: 131–152
- 5 DeRosa M L, Schrijver C J, Barnes G, et al. A critical assessment of nonlinear force-free field modeling of the solar corona for active region 10953. *Astrophys J*, 2009, 696: 1780–1791
- 6 Aschwanden M J, Winebarger A, Tsiklauri D, et al. The coronal heating paradox. *Astrophys J*, 2007, 659: 1673–1681
- 7 Aschwanden M J, Boerner P. Solar corona loop studies with the atmospheric imaging assembly. I. Cross-sectional temperature structure. *Astrophys J*, 2011, 732: 81–95
- 8 Aschwanden M J, Boerner P, Schrijver C J, et al. Automated temperature and emission measure analysis of coronal loops and active regions observed with the atmospheric imaging assembly on the solar dynamics observatory (SDO/AIA). *Sol Phys*, 2013, 283: 5–30
- 9 Aschwanden M J, Peter H. The width distribution of loops and strands in the solar corona—Are we hitting rock bottom? *Astrophys J*, 2017, 840: 4–27
- 10 Brooks D H, Warren H P, Ugarte-Urra I, et al. High spatial resolution observations of loops in the solar corona. *Astrophys J Lett*, 2013, 772: 19–23
- 11 Peter H, Bingert S, Klimchuk J A, et al. Structure of solar coronal loops: From miniature to large-scale. *Astron Astrophys*, 2013, 556: 104–109
- 12 Li H, Zhao M, Liu Y. A new coronal loop identification method based on phase congruency. *Chin Astron Astrophys*, 2017, 41: 357–380
- 13 McAteer R T J, Kestener P, Arneodo A, et al. Automated detection of coronal loops using a wavelet transform modulus maxima method. *Sol Phys*, 2010, 262: 387–397
- 14 Biskri S, Antoine J P, Inhester B, et al. Extraction of solar coronal magnetic loops with the directional 2D morlet wavelet transform. *Sol Phys*, 2010, 262: 373–385
- 15 Durak N, Nasraoui O, Schmelz J. Automated coronal-loop detection based on contour extraction and contour classification from the SOHO/EIT images. *Sol Phys*, 2010, 264: 383–402
- 16 Aschwanden M J, Lee J K, Gary G A, et al. Comparison of five numerical codes for automated tracing of coronal loops. *Sol Phys*, 2008, 248: 359–377
- 17 Aschwanden M J. A code for automated tracing of coronal loops approaching visual perception. *Sol Phys*, 2010, 262: 399–423
- 18 Chaudhuri S, Chatterjee S, Katz N, et al. Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters. *IEEE Trans Med Imag*, 1989, 8: 263–269
- 19 Wallingford R M, Siwek E M, Gray J N. Application of two-dimensional matched filters to X-ray radiographic flaw detection and enhancement. Boston, MA: Springer, 1992. 879–886
- 20 Aschwanden M J. Nonlinear force-free magnetic field fitting to coronal loops with and without stereoscopy. *Astrophys J*, 2013, 763: 115–140

- 21 Aschwanden M J, Reardon K, Jess D B. Tracing the chromospheric and coronal magnetic field with AIA, IRIS, IBIS, and ROSA data. *Astrophys J*, 2016, 826: 61–79
 - 22 Yang K. Magnetic field topology associated with solar eruptive events and coronal heating (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2018 [杨凯. 太阳爆发事件和日冕加热中磁拓扑的研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2018]
 - 23 Aschwanden M J, Wuelser J P, Nitta N V, et al. First three-dimensional reconstructions of coronal loops with the STEREO A+B spacecraft. III. Instant stereoscopic tomography of active regions. *Astrophys J*, 2009, 695: 12–29
 - 24 Wiegmann T, Inhester B, Feng L. Solar stereoscopy—Where are we and what developments do we require to progress? *Ann Geophys*, 2009, 27: 2925–2936
-

补充材料

图S1 不同像元尺寸的双通滤波器对不同环宽的分离

图S2 冕环主轴局部方向及其垂直方向的颜色图

图S3 证明精细冕环包含在图像中

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “冕环的自动检测算法和宽度统计分析”

The automated detection algorithm of coronal loop and statistical analysis of its width

Zhiming Song^{1,2*}, Hongbo Li³ & Zhongquan Qu^{1,2}

¹ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

³ Institute of Space Physics, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, China

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

Coronal loop is an important component of solar corona, and it is useful for us to study its size, morphological structure and evolution as a result of that the studies will help us to better understand the internal structure of coronal loop. In the meantime, the studies can further provide us a clue of comprehending the construction of solar corona, the evolution of solar active region, coronal heating process, coronal magnetic field and the properties of plasma of solar corona. Currently, the majority of the scientific studies associated with coronal loop just focus on small sample analyses, which is mainly due to that the advances of automated detection algorithms of coronal loop and their scientific applications lag behind the theoretical studies of coronal loop. Although, some automated detection algorithms of coronal loop have been developed, just the algorithm named as Oriented Coronal CURved Loop Tracing (OCCULT), which has a satisfactory performance in comparison with other existing algorithms, is applied to the scientific studies associated with coronal loop. However, the algorithm, OCCULT, is not sensitive to the weak and fine coronal loops, resulting in that its detection results lack of the coronal loops with weak intensities and fine structures. Clearly, the disadvantage of OCCULT mentioned above makes its results of large sample statistical analyses incomplete. For example, in the large sample statistical analysis of the widths of cross-section profiles of coronal loops, the statistical results of OCCULT are incomplete because the coronal loops with weak intensities and fine structures cannot be detected by it. Therefore, in this paper, a more effective detection algorithm of coronal loop is developed and further applied to the large sample statistical analysis of the widths of coronal loops to obtain more complete statistical distribution of the widths of coronal loops. First of all, in this paper, the developed algorithm of automatically detecting coronal loops based on matched filtering technique and unsharp-masking enhancement is described. Secondly, the coronal loops contained in the images of Atmospheric Imaging Assembly (AIA) of Solar Dynamics Observatory (SDO) and High-resolution Coronal Imager (Hi-C) are detected by the developed algorithm, and then the detection results are compared with those of the algorithm, OCCULT, so as to indicate that the developed algorithm can detect more coronal loops, especially the coronal loops with weak intensities and fine structures. Thirdly, the local directions of the main axes of the detected coronal loops are extracted, and corresponding cross-section profiles of the coronal loops are obtained, resulting in that the widths of the coronal loops are automatically calculated and statistically analyzed. Finally, the conclusions are obtained. (1) In comparison with OCCULT, the performance of the developed algorithm is more excellent, indicating that in addition to calculating and statistically analyzing the widths of coronal loops, the developed algorithm can also be used to other scientific applications related to coronal loops. (2) In comparison with OCCULT, the large sample statistical results of the widths of coronal loops of the developed algorithm are more complete. (3) In comparison with the high resolution of Hi-C, the resolution of AIA/SDO cannot distinguish most of coronal loops with fine structures.

solar corona, coronal loop, matched filtering, detection, statistical analysis

doi: [10.1360/TB-2019-0514](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0514)