

文章编号: 1005-0523(2022)04-0105-07



EBSD 花样菊池带的快速识别

解洪力, 韩明, 王善瑞

(华东交通大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 领域引入 Hough 变换, 实现了由计算机自动识别 EBSD 花样中的菊池带, EBSD 技术由此发展成为表征晶体材料取向的一种重要手段。由于 Hough 变换的速度远远慢于扫描电子显微镜中电子束的移动速度, 如何快速实现 Hough 变换已成为整个 EBSD 领域亟待解决的关键问题。分别利用中央处理器 (central processing unit, CPU) 和统一计算设备架构 (compute unified device architecture, CUDA) 对 EBSD 花样做 Hough 变换, 详细比较了两者的耗时和识别结果, 测试表明: CPU 对 EBSD 花样菊池带的最快识别速度为 1.7×10^3 FPS, 同样条件下, CUDA 对 EBSD 花样菊池带的识别速度最快可达 1.7×10^4 FPS, 远远超过 CPU 的最快识别速度, 且利用 CUDA 进行 Hough 变换并没有影响 EBSD 花样菊池带的识别效果。基于 CUDA 的 Hough 变换将成为快速识别 EBSD 花样菊池带的一个发展趋势。

关键词: EBSD 花样; Hough 变换; CUDA; 并行计算; 菊池带

中图分类号: TH89

文献标志码: A

本文引用格式: 解洪力, 韩明, 王善瑞. EBSD 花样菊池带的快速识别[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 105-111.

Fast Identification of Kikuchi Bands in EBSD Patterns

Xie Hongli, Han Ming, Wang Shanrui

(School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the field of electron backscatter diffraction (EBSD), Hough transform was introduced to realize the automatic identification of Kikuchi bands in EBSD patterns by means of computer, and EBSD technique has been developed into an important means to characterize orientation of crystalline materials. Since the speed of Hough transform is much slower than the moving speed of electron beam in scanning electron microscope, how to carry out Hough transform quickly has become a key problem that needs to be solved urgently in the whole EBSD field. In the present work, central processing unit (CPU) and compute unified device architecture (CUDA) were used to perform Hough transform on EBSD patterns, respectively, and the time consumption and recognition results were compared. The results show that the fastest recognition speed of Kikuchi bands is 1.7×10^3 EBSD patterns per second for CPU. Under the same conditions, CUDA can process 1.7×10^4 EBSD patterns per second, which is far faster than the fastest recognition speed of CPU. More importantly, Hough transform based on CUDA does not affect the identify results of Kikuchi bands in EBSD patterns. As a result, Hough transform based on CUDA technique will become a trend for fast identification of Kikuchi bands from EBSD patterns.

Key words: EBSD patterns; Hough transform; CUDA; parallel computing; Kikuchi bands

收稿日期: 2021-10-31

基金项目: 江西省自然科学基金重点项目(2016ACB20010)

Citation format: XIE H L, HAN M, WANG S R. Fast identification of Kikuchi bands in EBSD patterns [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 105–111.

电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 作为扫描电子显微镜的一种常规附件, 同时具备了 X 射线分析和透射电子显微镜中电子衍射的特点, 在材料科学和地球科学等领域得到了广泛的应用, 如单晶体取向测定^[1-2], 多晶体织构分析^[3-4]、相鉴别^[5-6]、晶粒尺寸测量^[7-8]、应力应变测定^[9-10]和地壳构造变形分析^[11-12]等, EBSD 技术已经成为材料微观表征不可或缺的重要手段。

EBSD 花样含有材料丰富的晶体学信息, 一张典型的 EBSD 花样通常含有几十条可见的菊池带, 由于 Hough 变换^[13]被成功用于识别这些菊池带, 实现了已知晶体晶面和带轴指数的快速标定。特别是上世纪九十年代 Lassen^[14]改进的 Hough 变换, 进一步提高了 EBSD 花样的识别和标定速度, EBSD 技术得到了广泛推广。如今, 英国的 Oxford 公司、美国的 EDAX 公司和德国的 Bruker 公司几乎垄断了 EBSD 领域硬件和软件的国内外市场。从原理上说, 传统 Hough 变换算法只能识别图像中的直线特征, 但是 EBSD 衍射几何决定了花样中的菊池带具有双曲线状的边界。为了直接识别菊池带的双曲线边界, Maurice 等^[15]提出了一种三维 Hough 变换的算法, 然而这种方法依赖于准确的投影源 (PS) 位置, 并没有从根本上解决 Hough 变换结果误差大的问题, 所以该方法并未在 EBSD 实际应用中得到推广。相比于三维 Hough 变换, 传统 Hough 变换具有稳定性高、不受投影源位置误差影响等优势, 至今上述三大厂商仍采用基于中央处理器 (central processing unit, CPU) 的传统 Hough 变换识别 EBSD 花样中的菊池带。由于 Hough 变换是一种一对多的图像变换算法, 即 EBSD 花样 X - Y 坐标系中每个像素映射到 ρ - θ 坐标系时都变成一条曲线, 这种映射关系决定了 Hough 变换的耗时随图像像素数量的增加呈指数级增长, 所以计算量大且耗时长是 Hough 变换算法的主要短处。标定已知晶体的 EBSD 花样时, Hough 变换的耗时几乎占据了标定的总时长, 在花样像素数量少且仅识别四条不共带轴的菊池带情况下, 目前最先进的 EBSD 商业软件标定速度最快

可达到 4×10^3 FPS^[16], 但仍远远慢于 EBSD 花样的采集速度。此外, 降低图像的像素数量虽然能显著提高 Hough 变换速度, 但会导致 Hough 变换结果的误差增大, 从而明显降低 EBSD 花样标定结果的可信度。在不影响 EBSD 花样标定结果的情况下, 如何快速实现 Hough 变换已成为 EBSD 用户和厂家共同关注并亟待解决的关键问题。

计算机技术经过近几十年的发展, CPU 已经成为超大规模集成电路, 芯片中的晶体管数量不可能无限制增加, 摩尔定律早已失效, 为提高计算速度, CPU 由单核发展出多核, 但由于保留了大量的缓存, 多核 CPU 的计算能力依然受限。NVIDIA 公司于 2006 年基于显卡提出统一计算设备架构 (compute unified device architecture, CUDA)^[17], 利用 CUDA 可实现计算的高度并行化。从硬件角度来讲, 目前一个 CPU 至多拥有十几个运算核心, 而显卡中运算核心的数量能高达几千个, 庞大的核心数量为 CUDA 的并行计算提供了硬件支持, CUDA 高性能并行计算是未来的发展趋势。

本文分别采用 CPU 的多线程技术和 CUDA 高性能并行计算技术对 EBSD 花样做 Hough 变换, 研究了 CPU 线程数量、EBSD 花样 (原始图像) 像素数量和 Hough 变换结果图像 (目标图像) 像素数量对 Hough 变换时间的影响, 从不同并行模式和显卡安装方式两个角度对比了 CPU 和 CUDA 的 Hough 变换时间, 最后比较了两者的识别结果。

1 方法

本实验基于容天工作站对 EBSD 花样做 Hough 变换, 操作环境为 Windows10 系统, 编程使用 C 语言, CPU 型号为 Xeon E5-2643 (6 核), 显卡型号为 Tesla K20c (2496 核), 程序基于 VS2017 软件编写, CUDA 版本为 10.2, 图像处理使用 OpenCV 库。

在二维图像 X - Y 平面坐标系中, 直线 L 的方程可以表示为

$$y=kx+b \quad (1)$$

式中: k 为斜率, b 为截距。

如图1(a)所示,连接 X - Y 平面内的任意两点(A_1, A_2)所形成的直线方程如式(1)所示,过点 O 作直线 L 的垂线,垂足为 A_0 ,线段 OA_0 与 X 轴的夹角为 θ ,原点 O 与直线 L 的距离为 ρ 。根据式(2)可以将二维图像 X - Y 坐标系中一个点转换到 ρ - θ 参数坐标系中变成一条曲线

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

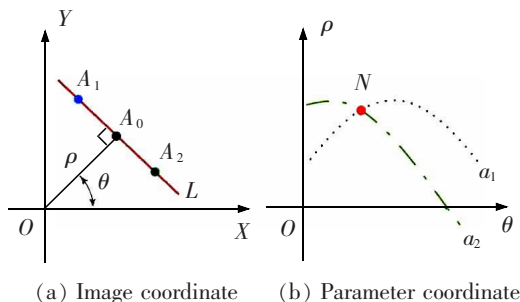


图1 Hough 变换原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Hough transform

X - Y 坐标系中点 A_1 和点 A_2 分别对应 ρ - θ 坐标系中曲线 a_1 和曲线 a_2 ,所以 ρ - θ 坐标系中两条曲线的交点对应 X - Y 坐标系中直线。从图1(b)可以看出,两条曲线在点 N 处相交,即参数坐标系中点 N 代表二维图像坐标系中的直线 L 。通过上述方式,Hough 变换将二维图像坐标系中直线映射到参数坐标系中形成交点,从而把检测任意直线的问题转化为统计交点的问题。

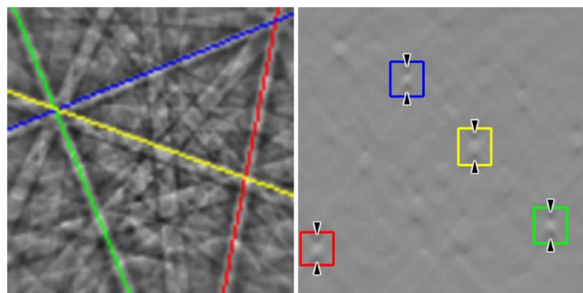
本文在研究不同并行模式对 Hough 变换时间的影响时,因启动线程、开辟资源等需要消耗时间,若只统计一张 EBSD 花样的 Hough 变换时间,其结果具有不确定性,这里求取 1 000 张 EBSD 花样的平均时间作为 Hough 变换时间,减小了实验数据的误差与波动。此外,为了保证 Hough 变换结果图像的真实性,原始图像像素数量应该大于目标图像像素数量。另一方面,在探究 CUDA 技术对 Hough 变换时间的影响时,显卡与主板共有两种连接方式,第一种是通过 PCIE X16 插槽直接将显卡连接主板,实现显卡的内置,这也是目前最常见的一种连接方式;第二种是外置显卡,首先将 PCIE X1 转接口的一端连接到主板,另一端通过 USB3.0 线将 PCIE X1 转接板与 PCIE X16 底座相连,最后将显卡连接到 PCIE X16 底座上。需要指出的是,利用 CUDA 对 EBSD 花样做 Hough 变换,首先从 CPU 端

将数据传递到显卡端,然后利用 CUDA 进行计算,最后从显卡端将计算结果回传给 CPU 端,所以 Hough 变换时间为数据传递时间和 CUDA 运算时间之和。

2 结果与讨论

图2是一张 EBSD 花样及其 Hough 变换的结果,从图2(b)中可以看到每个方框中存在一个清晰的亮点,在亮点的上下两侧的箭头所示位置存在一对黑点,其中每个黑点代表菊池带的一条边界。

2.1 图像像素数量对运算时间的影响



(a) EBSD pattern (b) Hough transform result

图2 EBSD 花样的 Hough 变换

Fig.2 Hough transform of EBSD pattern

从图3可以看出,利用 CPU 对 EBSD 花样做 Hough 变换,随着 CPU 线程数量的增加,Hough 变换时间明显减少。在 CPU 线程数量增加至核心数量之前,Hough 变换时间减少较快,如 CPU 线程数量由 1 增加至 2 时,Hough 变换时间几乎减小一半,这表明 CPU 的多核并行计算优势得到了充分发挥;当线程数量超过核心数量,即线程数量大于 6,CPU 会自动开启超线程,此时一个核心可以同时调度两个线程。若持续增加 CPU 的线程数量,Hough 变换时间仍会减少,但减少幅度会有所降低,其原因是 CPU 在调度线程时存在切换线程和开辟资源等方面的时间损耗,但利用 CPU 的多核技术和超线程技术,可以减少 Hough 变换时间,加快 EBSD 花样的菊池带识别速度。

图3显示了在同一 CPU 线程数量情况下,不同原始图像、不同目标图像对 Hough 变换时间的影响,当原始图像像素数量或者目标图像像素数量增加时,Hough 变换时间都会对应增加,但两者的增加幅度有所不同。以 1 个 CPU 线程为例,在 A 的情况下,即原始图像和目标图像像素数量都为 40 像素 \times

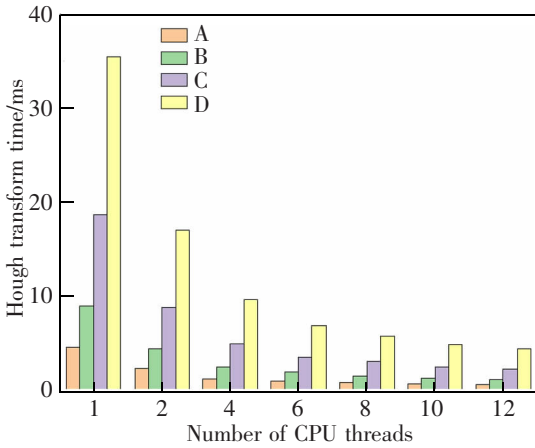


图3 CPU影响Hough变换的因素

Fig.3 Factors influencing Hough transform by CPU

40像素,此时Hough变换时间为4.8ms。B与A相比,目标图像的横向和纵向像素数量都增加一倍,Hough变换时间对应增加一倍,而C相比于A而言,原始图像横向和纵向像素数量都增加一倍,Hough变换时间增加至原来的4倍。由此可见,原始图像像素数量对Hough变换时间的影响更大,这是由Hough变换算法决定的。原始图像利用二重循环扫描每个像素点得到对应坐标,原始图像横向和纵向的像素数量都增加一倍,即X轴方向和Y轴方向上像素数量均增加一倍,扫描所需的工作量增大至原来的4倍;目标图像仅通过一重循环扫描 θ 轴方向的坐标,然后利用式(2)求解得出 ρ 轴方向的坐标,即 ρ 轴不需要通过循环求解。所以当目标图像横向和纵向的像素数量都增加一倍时,扫描所需的工作量只增加一倍。D与A相比,同时增加原始图像和目标图像的像素数量,Hough变换时间大幅增加。综上所述,CPU线程数量越多,图像像素数量越少,Hough变换时间越短。

结合图3所示CPU的Hough变换数据,表1

表1 CPU与CUDA的Hough变换时间对比

Tab.1 Comparison of Hough transform time between CPU and CUDA

Type	Original image	Target image	CPU time/ms	CUDA time/ms	Speed-up ratio
A	40×40	40×40	0.56	0.056	10
B	40×40	80×80	1.11	0.144	7.71
C	80×80	40×40	2.19	0.087	25.17
D	80×80	80×80	4.38	0.208	21.06

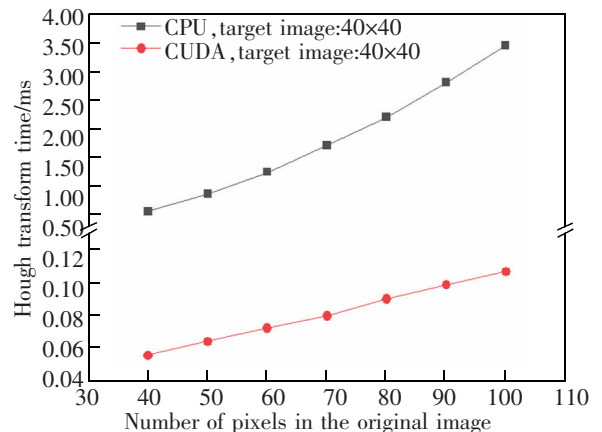
Note:1.CPU time is the statistics of 12 threads;2.Acceleration ratio=CPU time/CUDA time.

给出了CPU与CUDA的详细对比,无论是原始图像还是目标图像,图像像素数量增加,Hough变换时间均增加。需要指出的是,CUDA的加速比与图像像素数量有关,表中第1行与第3行的数据给出了原始图像像素数量对CPU时间、CUDA时间和加速比的影响。当原始图像像素数量由40×40增加至80×80时,CPU时间从0.56ms增加至2.19ms,CUDA时间从0.056ms增加至0.087ms,加速比从10增加至25.17,可见原始图像像素数量增加,CUDA的加速比增大;第1行与第2行的数据相比,目标图像像素数量从40×40增加至80×80,CPU时间和CUDA时间都增加,但加速比从10降低至7.71,CUDA的加速程度减小。综合分析,当图像像素数量增加时,CPU时间和CUDA时间均增加;原始图像像素数量增加,CUDA的加速比增大,目标图像像素数量增加,CUDA的加速比减小。同理,第1行与第4行数据相比,原始图像像素数量和目标图像像素数量均增加,CUDA的加速比为21.06,处于7.71至25.17区间内,符合上述推断。

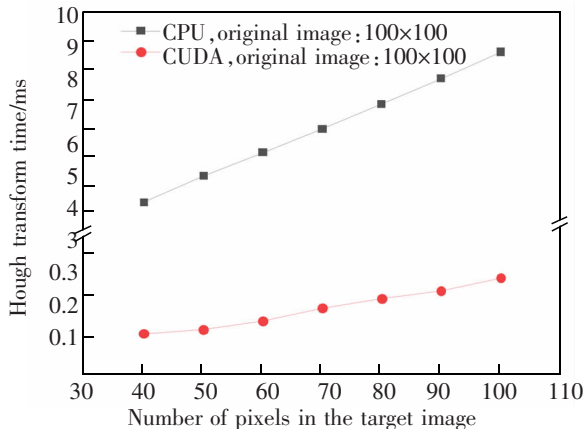
2.2 不同并行模式下Hough变换时间的对比

如图4所示,同一像素数量的情况下,与CPU相比,基于CUDA的Hough变换速度更快,原因是显卡的线程数量明显多于CPU的线程数量。

另外,从图4中还可以看出,基于CPU的Hough变换时间随原始图像像素数量增加呈指数级增长,这与图3所示的CPU实验结果一致。基于CUDA进行Hough变换,因原始图像中一个像素对应CUDA中一个线程,所以增加原始图像像素数量,基于CUDA的Hough变换时间近似呈线性关系增长。此外,目标图像像素数量增加, θ 轴方向上扫



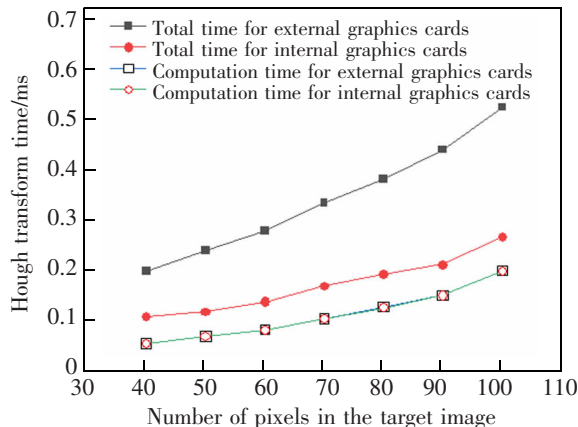
(a) The influence of original image on Hough transform time



(b) The influence of target image on Hough transform time

图 4 不同并行模式下 Hough 变换时间的对比

Fig.4 Comparison of Hough transform time under different parallel modes



(b) The influence of target image on Hough transform time

图 5 显卡安装方式对 CUDA 的 Hough 变换时间影响

Fig.5 Influence of graphics card installation mode on CUDA Hough transform time

描工作量对应增加, ρ 轴方向上扫描工作量无影响, 所以 CPU 和 CUDA 的 Hough 变换时间均近似呈线性关系增长。

2.3 显卡安装方式对 CUDA 的 Hough 变换时间影响

一般来说, 显卡数量越多, 程序的计算能力越强, 通常主板上的显卡插槽数量有限, 内置显卡的方式满足不了日益增长的计算需求, 可通过外置方式将显卡与主板连接。

实验结果如图 5 所示, 无论是内置显卡还是外置显卡, 随着图像像素数量增加, Hough 变换时间均对应增加。但需注意的是, 外置显卡的 Hough 变换时间约为内置显卡的两倍, 而两者的 Hough 变换计算时间相同, 时间差距主要在 CPU 端到显卡端的数据传递环节, 可以推断, 外置显卡虽会降低数据的传递速度, 但并未影响 CUDA 的计算速度。另外还可以发现, 基于 CUDA 的 Hough 变换时间主要消耗

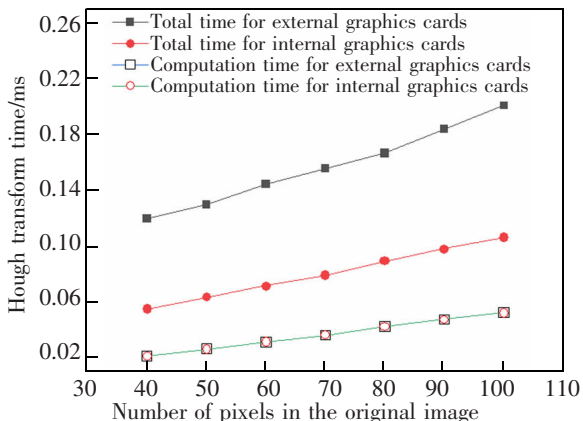
在数据传递环节, 计算环节并未占用过多时间, 这说明显卡的并行计算能力并没有得到充分发挥, 所以本实验的程序还存在一定的优化空间。

由此可见, 利用 CUDA 高性能并行计算技术可以大幅度减少 Hough 变换时间, 提高 EBSD 花样中菊池带的识别速度。在内置显卡的情况下, 原始图像像素数量和目标图像像素数量均为 40×40 , 基于 CUDA 的 Hough 变换总时间为 0.056 ms , 即 EBSD 花样中菊池带的识别速度最快可达到 $1.7 \times 10^4 \text{ FPS}$ 。这已远远超过 Oxford 公司商业软件 $4 \times 10^3 \text{ FPS}$ 的识别速度, 基于 CUDA 的 Hough 变换将成为快速识别 EBSD 花样菊池带的一个发展趋势。

2.4 不同并行模式下 EBSD 花样的识别对比

从上述实验结果可知, 基于 CUDA 的 Hough 变换速度远远快于 CPU, 本实验对比了 CPU 与 CUDA 的菊池带识别结果。菊池带上的数字代表 Hough 变换结果的最强峰顺序, 即 Hough 变换结果的峰值越强, 菊池带特征越明显, EBSD 花样所对应的菊池带序号越小, 结果如图 6 所示。

图 6(e)与图 6(i), 图 6(f)与图 6(j)相比, 两种并行模式的菊池带识别顺序完全一致, 识别结果无明显差异; 图 6(g)和图 6(k)所示的菊池带识别顺序有所不同, 具体表现为 5 号菊池带和 6 号菊池带的识别顺序相反, 这说明两种并行模式 Hough 变换结果图像的菊池带特征强弱程度相反; 图 6(h)与图 6(l)相比, 两种并行模式识别的 6 号菊池带并非同一条菊池带, 但可以肯定的是, 两条 6 号菊池带都是清晰存在的。另一方面, 从 Hough 变换结果图像



(a) The influence of original image on Hough transform time

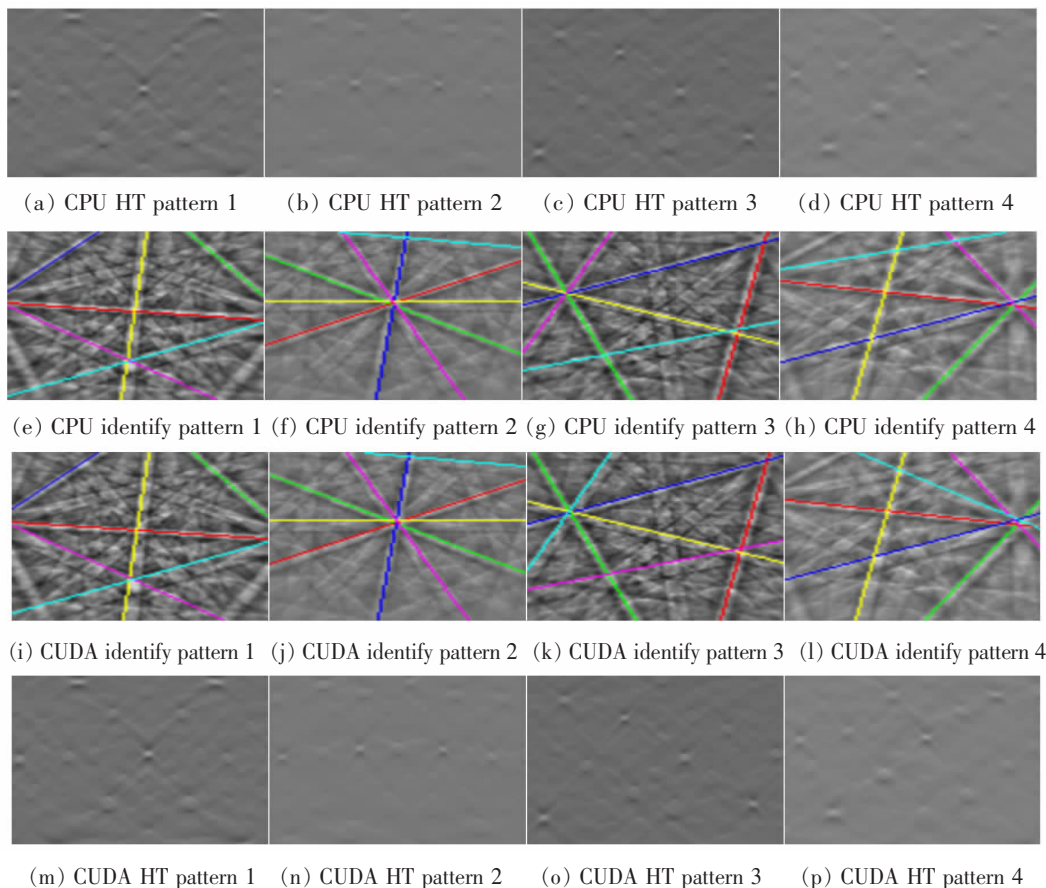


图 6 4 张 EBSD 花样中菊池带的识别结果

Fig.6 Identification results of Kikuchi bands in four EBSD patterns

上分析,图 6(a)~图 6(d)与图 6(m)~图 6(p)的对比可知,CPU 与 CUDA 对同一张 EBSD 花样的 Hough 变换结果没有可见的差异。综上所述,CPU 与 CUDA 虽在菊池带识别细节方面有轻微差异,但最终两者的识别结果基本相当。

3 结论

本文分别使用 CPU 与 CUDA 对 EBSD 花样做 Hough 变换,研究了图像像素数量、不同并行模式和显卡安装方式对 Hough 变换时间的影响,最后比较了两者的 EBSD 花样识别结果,主要结论如下。

1) CPU 线程数量增加,Hough 变换时间减少;图像像素数量增加,CPU 与 CUDA 的 Hough 变换时间均增加。

2) CPU 的原始图像像素数量与 Hough 变换时间呈指数关系增长,目标图像像素数量与 Hough 变换时间近似呈线性关系增长;CUDA 的原始图像像素数量与目标图像像素数量均与 Hough 变换时间近

似呈线性关系增长。

3) 内置显卡和外置显卡的 Hough 变换计算时间几乎完全相同,但外置显卡的 Hough 变换总时间约为内置显卡的两倍,原因在于 CPU 端到外置显卡端的数据传递需要较长时间。

4) CPU 与 CUDA 的菊池带识别结果没有本质区别,但 CUDA 的菊池带识别速度远远快于 CPU。

参考文献:

- [1] KUNZE K. Crystal orientation measurements using semebsd under unconventional conditions[J]. Powder Diffraction,2015, 30(2): 104-108.
- [2] 陈绍楷,李晴宇,苗壮,等. 单晶体取向的 EBSD 精确测定[J]. 电子显微学报,2005,24(4):384-384.
CHEN S K,LI Q Y,MIAO Z,et al. Single crystal orientation was accurately determined by EBSD [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society,2005,24(4):384-384.
- [3] DINGLEY D J,RANDLE V. Microtexture determination by

- electron back-scatter diffraction[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(17): 4545-4566.
- [4] 苏连朋,刘汉源,王文先,等. EBSD 技术及其在钛合金织构分析中的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(22): 1-6. SU L P, LIU H Y, WANG W X, et al. Research progress of EBSD technology and its research in texture analysis of titanium alloys[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(22): 1-6.
- [5] WRIGHT S I, DINGLEY D J, NOWELL M M. Determination of crystal structure from electron backscatter diffraction patterns[J]. Microscopy and Microanalysis, 2009, 15(2): 766-767.
- [6] PAYTON E J, AGUDO JACOME L, NOLZE G. Phase identification by Image processing of EBSD patterns[J]. Microscopy and Microanalysis, 2013, 19(2): 842-843.
- [7] 刘东戎,曹国剑,王丽萍,等. 一种定量分析 EBSD 测量体心立方合金凝固组织晶粒尺寸的方法:CN103902841B[P]. 2016-08-17. LIU D R, CAO G J, WANG L P, et al. A quantitative analysis method EBSD measuring body-centered cubic crystal grain size of the alloy solidification structure:CN103902841 B[P]. 2016-08-17.
- [8] 汪炳叔,辛仁龙,黄光杰,等. EBSD 分析技术在镁合金晶粒尺寸表征中的应用[J]. 电子显微学报, 2009, 28(1): 20-22. WANG B S, XIN R L, HUANG G J, et al. Applications of EBSD in measuring the grain size of magnesium alloy[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2009, 28(1): 20-22.
- [9] 黄亚敏,潘春旭. 基于电子背散射衍射(EBSD)技术的材料微区应力应变状态研究综述[J]. 电子显微学报, 2010, 29(1): 662-672. HUANG Y M, PAN C X. Micro-stress-strain analysis in materials based upon EBSD technique: a review[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010, 29(1): 662-672.
- [10] ONO Y, MORITO S, LI C. Stress measurement using EBSD analysis of grains in copper foil[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(5): 493-502.
- [11] 黄学猛,张进江,许志琴. 电子背散射衍射(EBSD)技术在地壳构造变形研究中的应用[J]. 地质学报, 2016, 90(6): 1130-1145. HUANG X M, ZHANG J J, XU Z Q, et al. The application of EBSD in the study of crustal structural deformation[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(6): 1130-1145.
- [12] 徐海军,金淑燕,郑伯让. 岩石组构学研究的最新技术: 电子背散射衍射(EBSD)[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 13. XU H J, JIN S Y, ZHENG B R. New technique of petrofabric: Electron Backscatter Diffraction(EBSD)[J]. Geoscience, 2007, 21(2): 13.
- [13] 刘健庄. 一种高效的 Hough 变换实现方法[J]. 信号处理, 1992, 8(1): 43-48. LIU J Z. An efficient implementation of the Hough transform[J]. Journal of Signal Processing, 1992, 8(1): 43-48.
- [14] LASSEN K N C. A new procedure for automatic high precision measurements of the position and width of bands in backscatter Kikuchi patterns[J]. Materials Science Forum, 1998(273/275): 201-208.
- [15] MAURICE C, FORTUNIER R. A 3D hough transform for indexing EBSD and kossel patterns[J]. Journal of Microscopy, 2008, 230(3): 520-529.
- [16] DING Z, PASCAL E, GRAEF M D. Indexing of electron back-scatter diffraction patterns using a convolutional neural network[J]. Acta Materialia, 2020, 199: 370-382.
- [17] 张舒,褚艳利. GPU 高性能运算之 CUDA[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. ZHANG S, CHU Y L. GPU High Performance Computing CUDA[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.



第一作者:解洪力(1997—),男,硕士研究生,研究方向为 EBSD 图像处理 and 软件编程等。E-mail:1749014976@qq.com。



通信作者:韩明(1965—),男,教授,博士,研究方向为材料微观结构表征。E-mail:mhancn@163.com。